BYG·DTU

Kurt Kielsgaard Hansen

FUGTTEKNISKE UNDERSØGELSER AF PAPIRULD MED EN NY FORMULERING AF IMPRÆGNERINGEN

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET

Sagsrapport
BYG·DTU SR-04-11
2004
ISSN 1601 - 8605

FUGTTEKNISKE UNDERSØGELSER AF PAPIRULD MED EN NY FORMULERING AF IMPRÆGNERINGEN

Kurt Kielsgaard Hansen

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

2004

Resume

Sorptionsisotermer for Papiruld imprægneret med henholdsvis ny formulering af imprægneringen og eksisterende bor-imprægnering og for imprægneringsstofferne separat er målt i klimaskabsopstilling ved 20 °C. Vanddamppermeabilitetskoefficienter for Papiruld imprægneret med ny formulering er målt ved vådkop- og tørkopforsøg. Ved et kapillarsugningsforsøg er målt opsuget vandmængde og kapillaritetstal. Ved afslutning af kapillarsugningsforsøget er dels vandindholdet i fire lag, dels middelvandindholdet bestemt.

Indholdsfortegnelse

Forord

1.	INDLEDNING	1
2.	SORPTIONSISOTERMER	1
2.1	Formål	1
2.2	Fremgangsmåde	1
2.2.1	Forsøgsbeskrivelse	4
2.3	Ligevægtsvandindholdet	4
2.4	Undersøgte produkter	4
2.5	Måleresultater	5
2.6	Diskussion	6
3.	VANDDAMPPERMEABILITET (KOPFORSØG)	7
3.1	Formål	7
3.2	Fremgangsmåde	7
3.3	Beregninger	11
3.3.1	Beregning af vanddamppermeabilitetskoefficienter	11
3.3.2	Korrektion for luftlagstykkelse og overgangsmodstande	12
3.4	Måleresultater	14
3.5	Diskussion	16
4.	KAPILLARSUGNING	16
4.1	Formål	16
4.2	Fremgangsmåde	16
4.3	Måling af vandindhold	17
4.4	Bestemmelse af sugehastighed	18
4.5	Det undersøgte produkt	19
4.6	Måleresultater	19
4.7	Diskussion	21
5.	KONKLUSION	23
6.	LITTERATUR	24

Appendix A – Indsvingning til ligevægt under adsorption ved 85 %RF for Papiruld imprægneret med ny formulering af imprægneringen.

Appendix B - Sorption - ligevægtsfugtindhold (u) [vægt%]

Appendix C - Vanddamppermeabilitetsmåling. Udskrevne rapporter fra KOPLYSE3 fra vådkop- og tørkopforsøg.

FUGTTEKNISKE UNDERSØGELSER AF PAPIRULD MED EN NY FORMULERING AF IMPRÆGNERINGEN

Forord

I denne rapport præsenteres resultaterne af fugttekniske undersøgelser af Papiruld med en ny formulering af imprægneringen. Projektet er udført i form af en samarbejdsaftale mellem firmaet Miljø Isolering ApS og BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet.

De udførte fugttekniske undersøgelser omfatter målinger af sorptionsisotermer, vanddamppermeabilitet og kapillarsugende egenskaber. Målinger af sorptionsisotermer er udført af laboratorieteknikker Ulla Gjøl Jacobsen, og målinger af vanddamppermeabilitet og kapillarsugende egenskaber er udført af laborant Britta Roll.

Kgs. Lyngby, den 5/11 2004
Kurt Kielsgaard Hansen
Lektor

FUGTTEKNISKE UNDERSØGELSER AF PAPIRULD MED EN NY FORMULERING AF IMPRÆGNERINGEN

1. INDLEDNING

Formålet med denne rapport er at præsentere resultaterne af fugttekniske undersøgelser af Papiruld med en ny formulering af imprægneringen. Den nye formulering består af imprægneringsstofferne 12 vægt% $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (Magnesiumsulfat), 12 vægt% $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ (Alun) og 3 vægt% C_6H_5COONa (Natrium benzoat E-211). Imprægneringsstofferne tilsættes papirfibrene som mug- og brandhæmmer. Den imprægnerede Papiruld er et løsfyldprodukt, mens imprægneringsstofferne er på pulverform.

De udførte fugttekniske undersøgelser omfatter målinger af sorptionsisotermer, vanddamppermeabilitet og kapillarsugende egenskaber, incl. tørstofbestemmelse, på prøveemner imprægneret med den nye formulering af imprægneringen. Af hensyn til sammenligning måles sorptionsisotermer for Papiruld imprægneret med den hidtil anvendte bor-imprægnering. Desuden måles separate sorptionsisotermer for de tre imprægneringsstoffer i den nye formulering.

2. SORPTIONSISOTERMER

2.1 Formål

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 *adsorption*. Tilsvarende tales om *desorption*, når materialet afgiver fugt. Den kurve, som angiver ligevægt mellem RF og vandindhold ved en given, fastholdt temperatur kaldes en sorptionsisoterm. Her omtales de udførte målinger af sorptionsisotermer for Papiruld imprægneret med henholdsvis ny formulering af imprægneringen og eksisterende bor-imprægnering. Desuden måles sorptionsisotermer for de tre imprægneringsstoffer i den ny formulering. Målingerne er udført ved 20 °C.

2.2 Fremgangsmåde

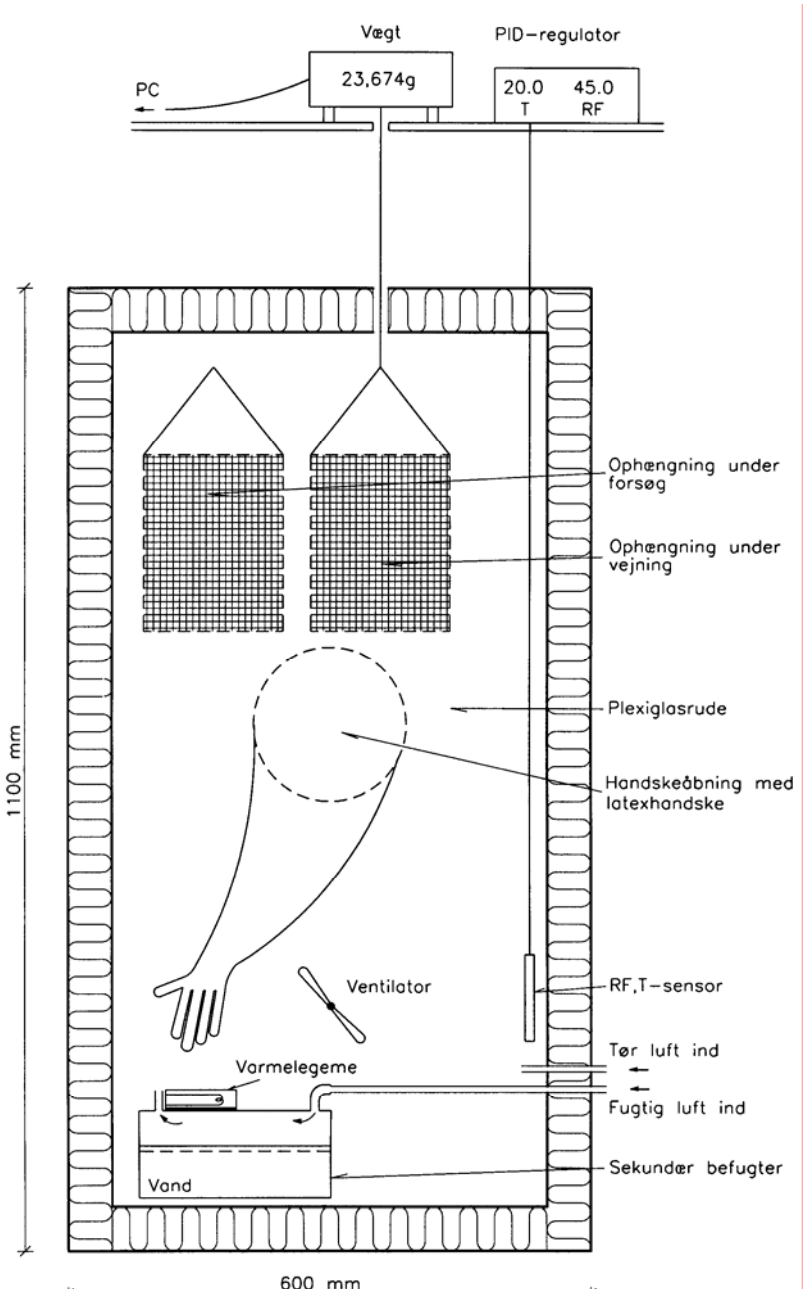
Måling af sorptionsisotermer er sket i BYG•DTUs klimaskab 5, der er specielt udviklet til porøse og hygroskopisk set meget hurtigt reagerende materialer. Opstillingen er udviklet i forbindelse med et ph.d.-projekt. For en detaljeret beskrivelse må henvises til /1/. Målemetoden er standardiseret i /2/. 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.

Figurrne 1, 2 og 3 viser en forenklet skitse og et fotografi 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 klimaskabet 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 af løsfyldprodukter er anbragt i poser af finmasket polyesternet 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 trådnet, under klimatisering henholdsvis under vejning, som antydet på figur 1. Prøveemner på pulverform – imprægneringsstoffer – anbringes i vejeglas, der placeres i teflonbakker som ligeledes via en bøjle er ophængt i klimaskabets trådnet.



Figur 1 Klimaskabsopstilling til måling af sorptionssisotermer ved 20 ^{0}C.



Figur 2 Klimaskabsopstilling på BYG•DTU til måling af sorptionsisotermer. De to klimaskabe til venstre benyttes til forsøg ved 20^0C.



Figur 3 Poser med Papiruld hænger til venstre, og to vejeglas med imprægneringsstoffer hænger foran. Et vejeglas med imprægneringsstof er under vejning.

I opstillingen er det muligt ved 20,0 ± 0,4 °C at opretholde en ønsket RF i intervallet 3% til 96% med en nøjagtighed på 0,2 à 2%; størst unøjagtighed ved høj RF.

2.2.1 Forsøgsbeskrivelse

Klimaskabet bringes i ligevægt ved 55% RF og 20 °C vha. sætpunkter (RF, temperatur) valgt på PID-regulatoren. Datafil og prøveemner (poser) oprettes i Sorption'99. Poser vejes og nummereres så numrene ses tydeligt gennem ruden. Materialet fyldes i de respektive poser/vejeglas, hvorefter disse vejes og tørres i 24 timer ved 40 °C. Poser/vejeglas placeres efter afkøling i klimaskabet.

Før vejning stoppes anlægget. Herved frigøres vægten ved hjælp af en luftcylinder. Sorption'99 aktiverer den indbyggede kalibreringsrutine for vægten før hver vejeserie. Vejeserien gennemføres. RF ændres når materialerne er bragt i fugtmæssig ligevægt med den omgivende luft.

Først bestemmes adsorptionsisotermen, dernæst desorptionsisotermen. Da en decideret udtørring af materialet, fx. i et tørreskab (ovn) kan risikere at ødelægge materialet eller påvirke eventuelle tilsætningsstoffer, 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. Her er anvendt tørring ved 40 °C i ventileret ovn til ligevægt (7 dage).

2.3 Ligevægtsvandindholdet

I dette projekt er foretaget mindst 3 vejninger med mindst 24 timers mellemrum mellem 2 vejninger ved den aktuelle RF-værdi. Som ligevægtskriterium ved den aktuelle RF-værdi er anvendt, at posen/vejeglasset skal svinge omkring en given masse. Alternativt anvendes massen ved sidste vejning af tidsmæssige årsager. At 3 målinger er tilstrækkeligt til at fastlægge ligevægtsværdien ses også af, at masseændringen i efterfølgende eksempel er meget lille fra vejning 3 til vejning 4, jf. Container 323 i Appendix A. En masseændring på 0,004 g svarer til ændring af vandtørstof-forholdet på 0,004g/12,816g = 0,0003 = 0,03 vægt%. Ved enkelte RF-værdier er der ikke indtrådt ligevægt for to af imprægneringsstofferne, men dette er markeret ved enkeltresultaterne i Appendiks B.

Ligevægtsvandindholdet i vægt-%, u, bestemmes på basis af tørmassen, m_{40}, og den estimerede masse ved fugtligevægt, m_0, for en given RF:

$$u = \frac{m_0 - m_{40}}{m_{40}} \cdot 100\% \qquad (1)$$

2.4 Undersøgte produkter

Tabel 1 giver en oversigt over de undersøgte produkter. Produkterne angives ved deres kaldenavn. Der bestemmes ad- og desorptionsisotermer ved 20 °C vha. klimaskabs-opstillingen.

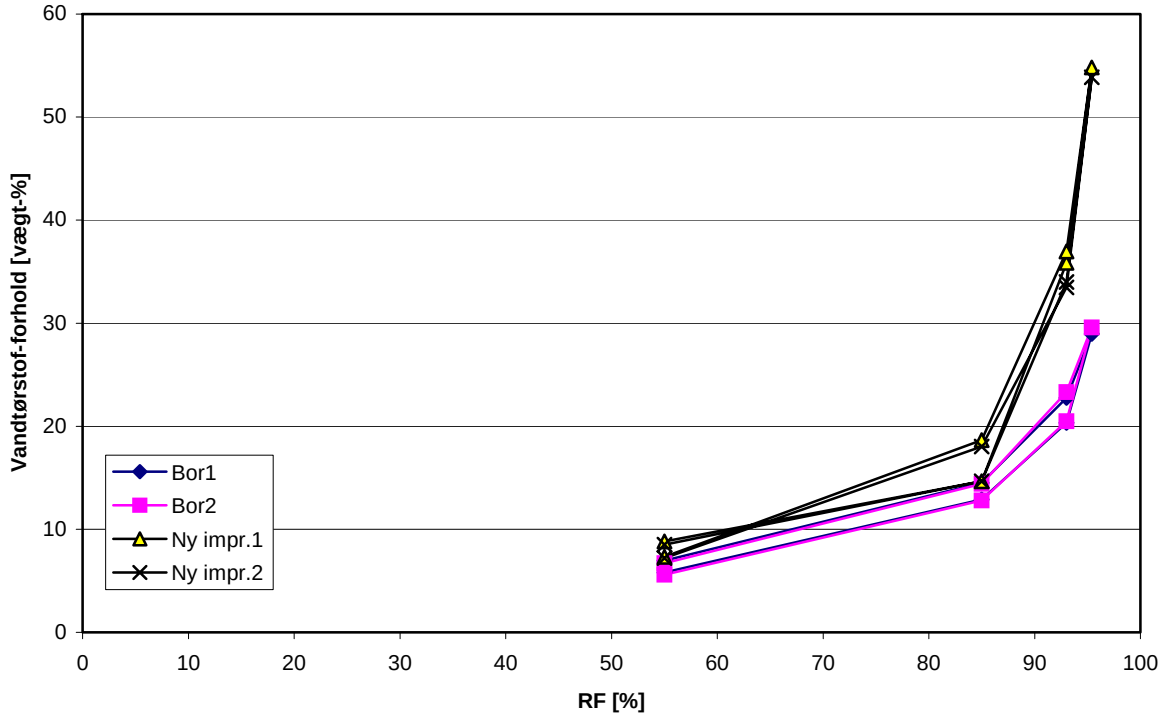
Tabel 1 Oversigt over undersøgte produkter.

Produkt (kaldenavn)	Beskrivelse	Type [1]	Masse [2] [g]
Papiruld	Imprægneret med bor	L	8,612
Papiruld	Imprægneret med bor	L	9,599
Papiruld	Imprægneret med ny formulering	L	12,816
Papiruld	Imprægneret med ny formulering	L	11,472
Alun	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	P	6,723
Magnesiumsulfat	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	P	5,222
Natrium benzoat E-211	C_6H_5COONa	P	6,933

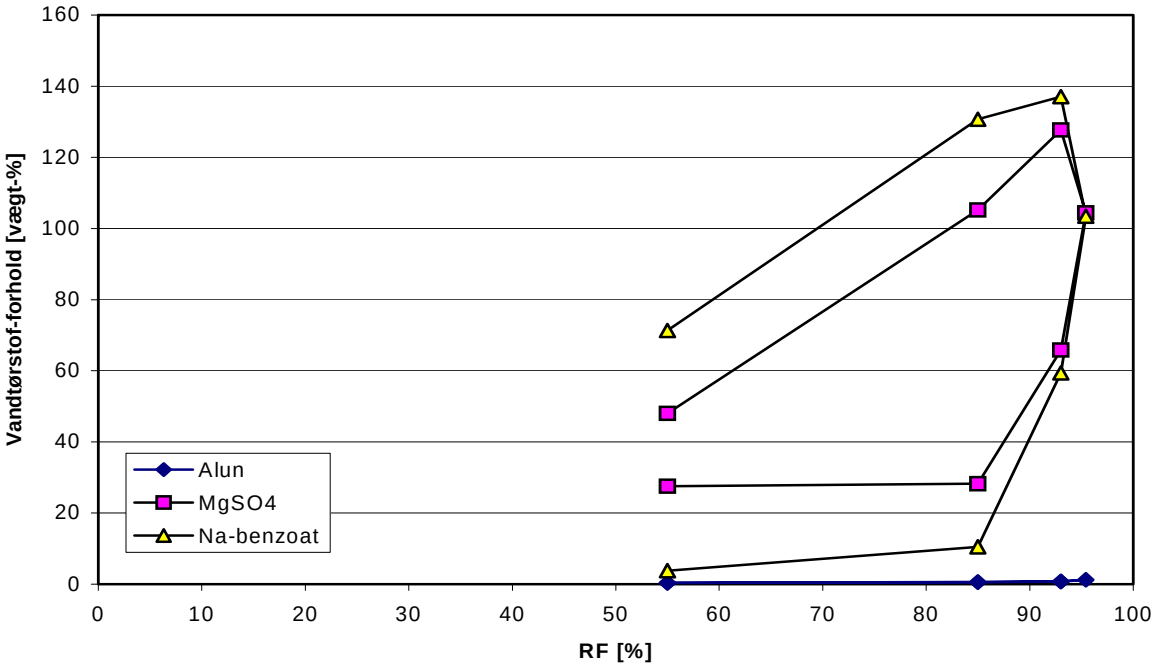
Note:
1) Her angives enten L = løsfyldprodukt eller P = pulver
2) Den angivne masse er bestemt efter tørring 24 timer ved 40 °C ved start af målinger.

2.5 Måleresultater

Der er udført adsorptionsmålinger på produkterne ved 55, 85, 93 og 95,4 %RF. Som start på adsorptionsmålingerne er produkterne som tidligere nævnt tørret i 24 timer ved 40 °C. Desorptionsmålingerne er udført ved 93, 85 og 55 %RF. Tørring af produkterne er sket efter bestemmelse af desorptionsisotermer. Sorptionsisotermer for Papiruld er vist i figur 4, og sorptionsisotermer for de tre imprægneringsstoffer er vist i figur 5. De til sorptionskurverne tilhørende talværdier for samtlige undersøgte produkter findes Appendix B.



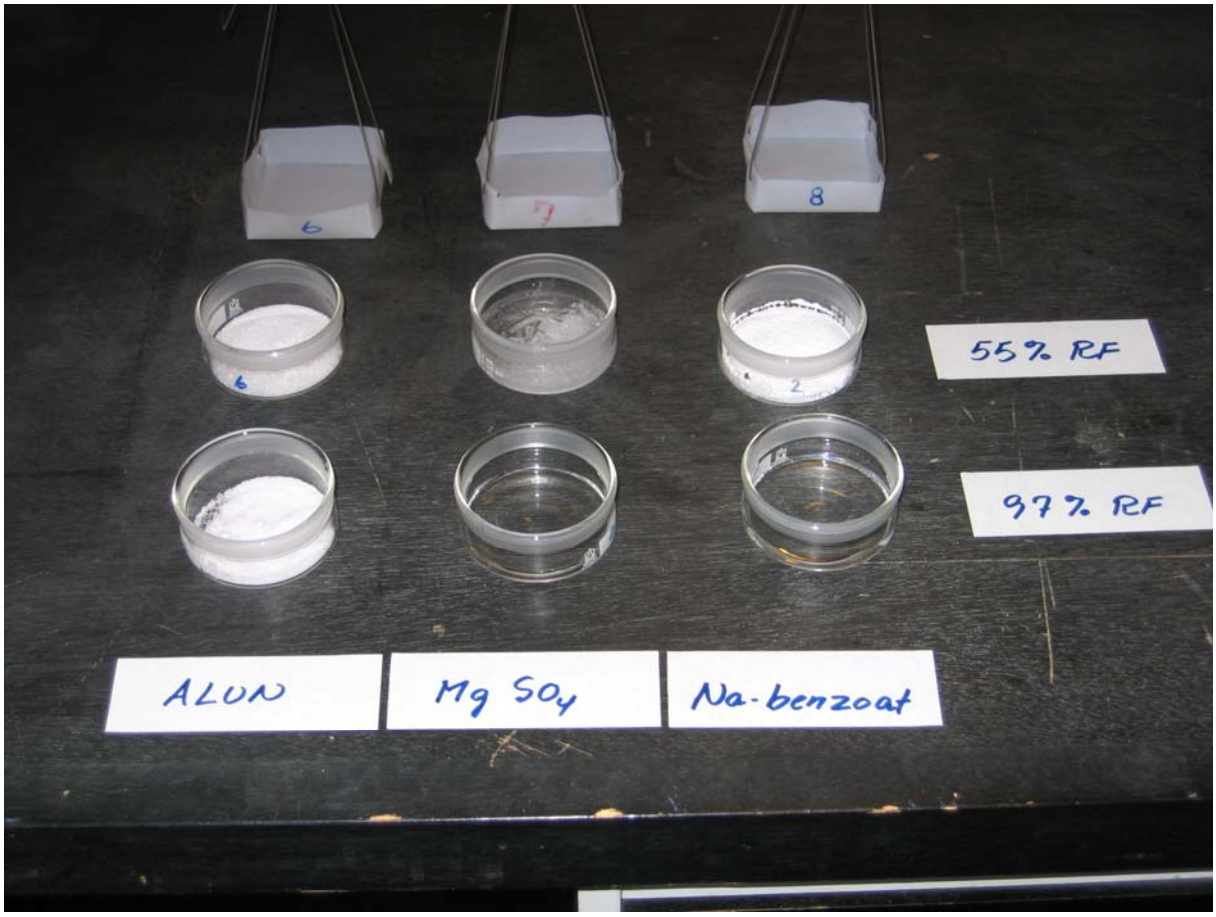
Figur 4 Sorptionsisotermer for Papiruld imprægneret med bor henholdvis imprægneret med ny formulering af imprægneringen. To prøveemner per imprægneringtype.



Figur 5 Sorptionsisotermer for de tre impræneringsstoffer. Et prøveemne per imprægneringsstof.

2.6 Diskussion

Sorptionsisotermer for Papiruld imprægneret med henholdsvis ny formulering af imprægneringen og eksisterende bor-imprægnering og for imprægneringsstofferne separat er målt i klimaskabsopstilling ved 20 °C. Op til 85 %RF er de målte vandtørstof-forhold ens for Papiruld imprægneret med henholdsvis ny formulering af imprægneringen og bor-imprægnering. Ved høje relative luftfugtigheder stiger den optagne vandmængde meget især for Papiruld imprægneret med den nye formulering af imprægneringen. Ved 95,4 %RF er vandtørstofforholdet næsten dobbelt så stort for Papiruld imprægnet med ny formulering af imprægneringen i forhold til vandtørstof-forholdet for Papiruld imprægneret med bor-imprægnering. Dette skyldes det meget store vandtørstof-forhold for imprægneringsstofferne magnesiumsulfat og natrium benzoat; disse imprægneringsstoffer har begge en meget stor vandoptagelse, jf. figur 5. Ved RF større end 85% er det visuelt konstateret, at både magnesiumsulfat og natrium benzoat har optaget så meget vand, at de begge er overgået til flydende form. På figur 6 er de tre tilsætningsstoffer alun, magnesiumsulfat og natrium benzoat fotograferet i vejeglas dels i ligevægt ved 97 %RF under adsorption, dels i ligevægt med 55 %RF under desorption. Magnesiumsulfat og natrium benzoat er helt flydende ved 97 %RF, men krystallerne gendannes ved 55 %RF under desorption. Alun har så lav fugtoptagelse, at den bliver på pulverform ved 97 %RF. I en ekssikkatoropstilling er fugtoptagelsen ved 97 %RF for magnesiumsulfat og natrium benzoat målt til henholdsvis 138 vægt-% og 276 vægt-%.



Figur 6 De tre tilsætningsstoffer alun, magnesiumsulfat og natrium benzoat fotograferet i vejeglas dels i ligevægt ved 97 %RF under adsorption, dels i ligevægt med 55 %RF under desorption. Magnesiumsulfat og natrium benzoat er helt flydende ved 97 %RF, men krystallerne gendannes ved 55 %RF under desorption. Alun har så lav fugtoptagelse, at den bliver på pulverform ved 97 %RF.

3. VANDDAMPPERMEABILITET (KOPFORSØG)

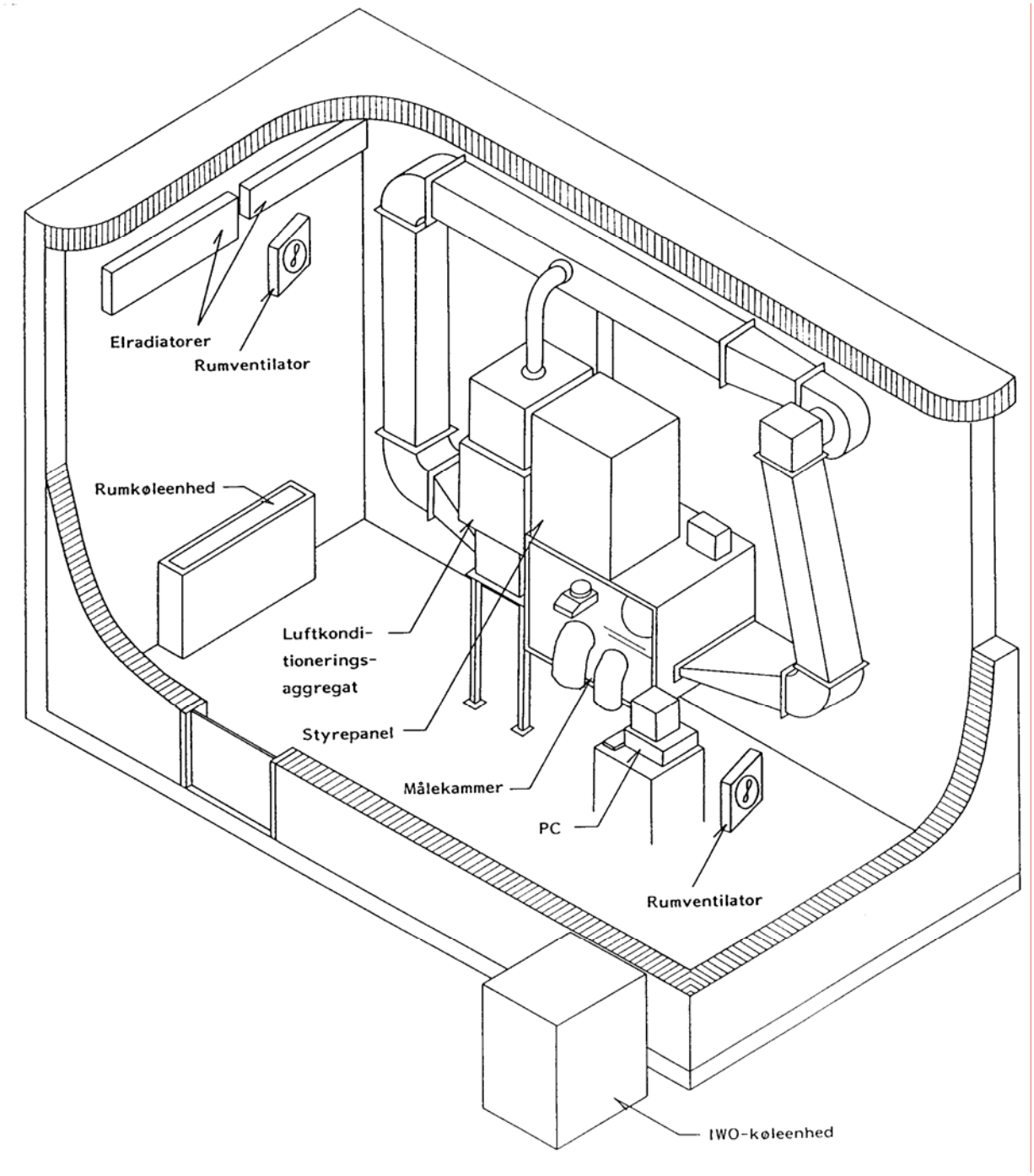
3.1 Formål

Formålet med kopforsøgene er at bestemme vanddamppermeabilitetskoefficienter for Papiruld imprægneret med ny formulering af imprægneringen under isoterme forhold. Målingerne udføres som vådkopmåling (94%/50% RF) og tørkopmåling (1%/50% RF) ved 23 °C.

3.2 Fremgangsmåde

Bestemmelse af vanddamppermeabilitetskoefficienten sker i BYG•DTUs såkaldte kopudstyr, bestående af et målekammer anbragt i et rum, der er kraftigt isoleret for at reducere klimapåvirkninger udefra. Desuden er rummet udstyret med radiatorer, rumkøleenhed og

ventilatorer, som skitseret i figur 7. I målekammeret opretholdes 50 ± 2% RF og 23,0 ± 0,3 °C, der registreres via en temperatur- og dugpunktsmåler på en PC.

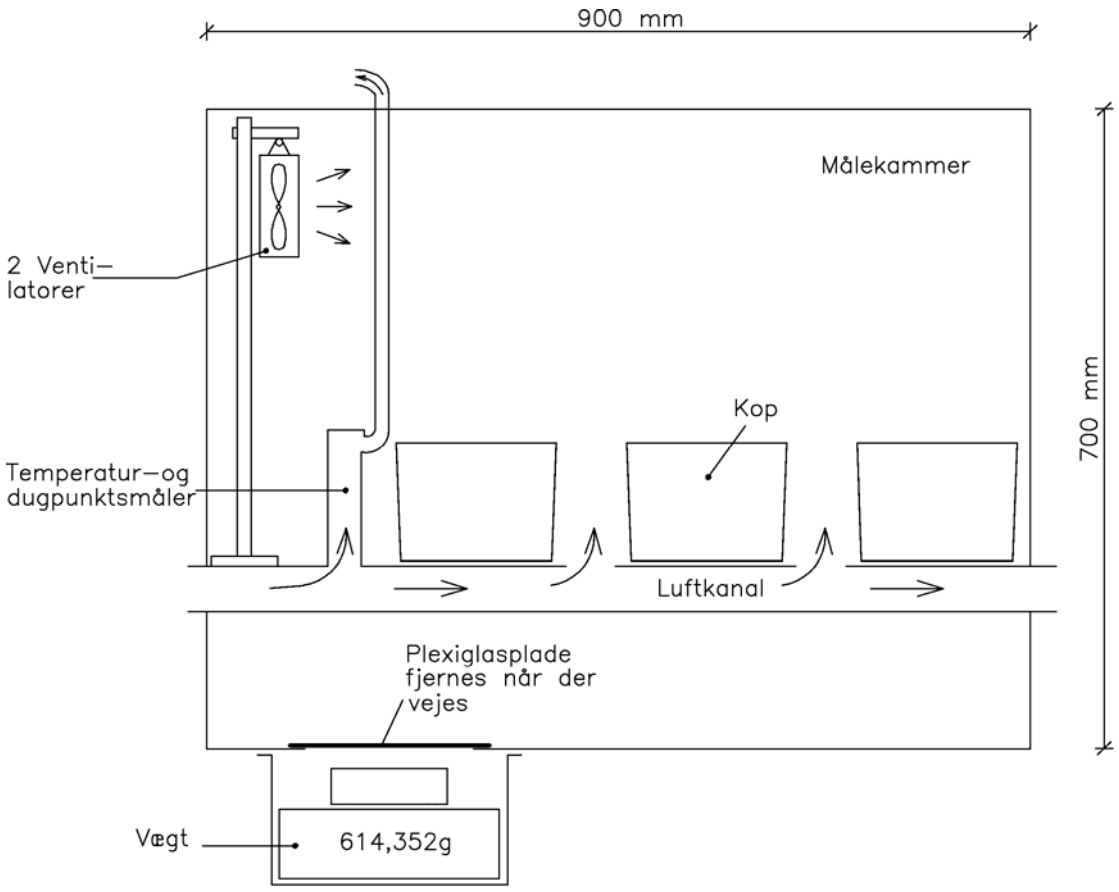


Figur 7 Kopudstyr til bestemmelse af vanddamppermeabilitetskoefficienten for Papiruld.

I målekammeret findes også ventilatorer til at sikre en tilstrækkelig luftcirkulation. Målekammeret er skitseret på figur 8.

Metoden kaldes et kopforsøg, fordi det undersøgte materiale anbringes som et "låg" på en kop. Forinden er anbragt en mængde af en given mættet saltopløsning eller et sorptionsmiddel i koppen til at styre RF. Afhængig af om RF i koppen er højere eller lavere end i klimakammeret, vil der ske en fugttransport ud af koppen eller ind i koppen under forsøget. Dette registreres ved løbende at veje koppen og notere sammenhørende værdier af tidspunkt og masse. Der vil med tiden etableres stationære forhold for fugttransporten, aflæst ved en retliniet sammenhæng mellem tid og masse. Hældningen af denne linie udtrykker materialets evne til at transportere fugt under de givne forhold og kan direkte omregnes til en vanddamp-permeabilitetskoefficient, som beskrevet i /3/, /4/, /5/. Beregningerne er vist nedenfor.

Prøveemnerne – her løsfyldprodukter - er anbragt i kopper fremstillet af plastspande med en indvendig diameter på 180 mm i toppen og 172 mm i bunden, figur 9. Et metalnet med en maskevidde på 4 mm samt et polyesternet med en maskevidde på 73 μm er anbragt i bunden. En saltopløsning eller et sorptionsmiddel er fyldt i en løs underdel til en højde af 10 mm fra bunden. Via en afstandsholder bestående af et ø100 mm plastrør bliver luftlaget mellem saltopløsning og metalnet således 15 mm. Polyesternettet benyttes for at undgå at løsfyldproduktet falder gennem metalnettet. Tætning mellem materiale og spandens inderside sikres ved hjælp af dobbeltklæbende tape. Der laves forsøg med 180 mm høje kopper, dvs. med en prøvetykkelse på 152 mm; tre parallelle forsøg ved henholdsvis vådkop- og tørkopmåling.

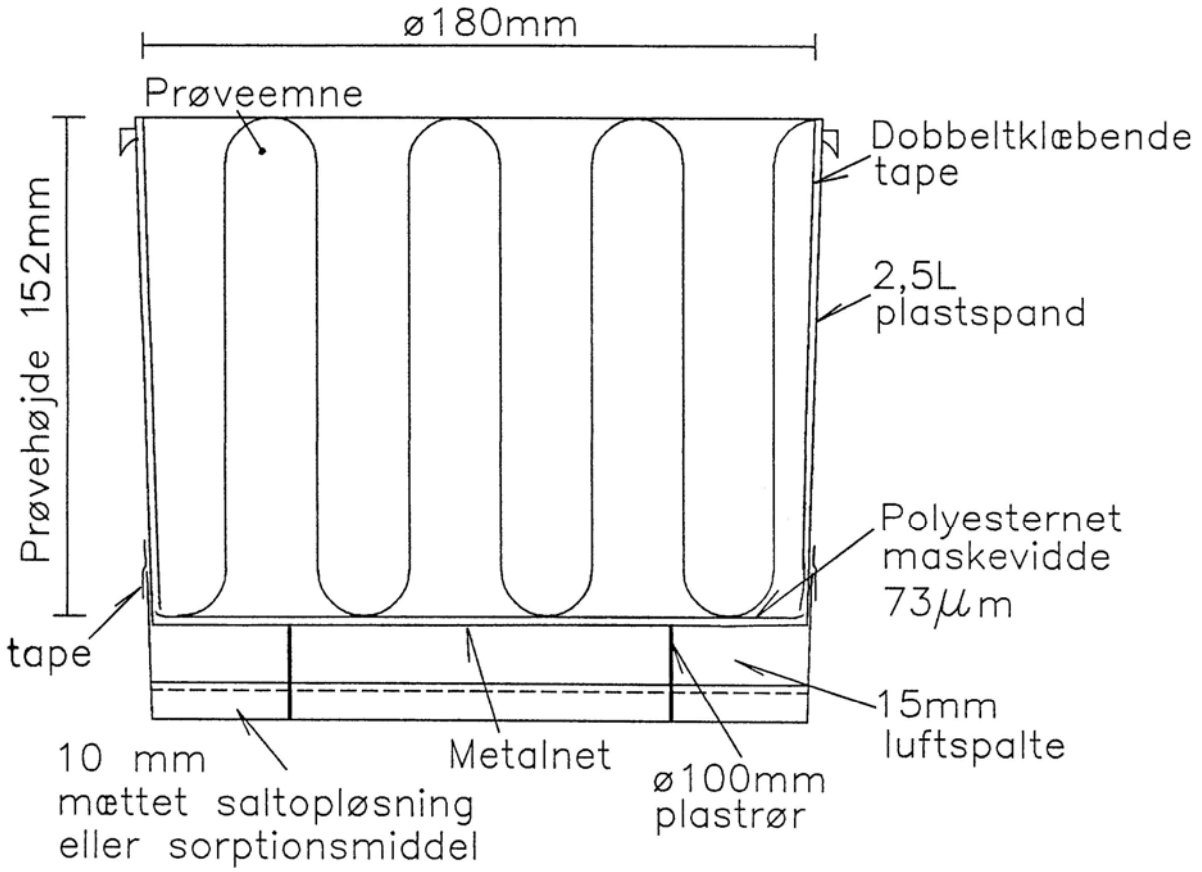


Figur 8 Målekammer med kopper, vægt og ventilatorer.

Målebetingelserne fremgår af tabel 2.

Tabel 2 Målebetingelser.

Målebetingelser	Målekammer	Kop
Vådkop - 50/94% RF	50% RF	94% RF (KNO_3)
Tørkop - 1/50% RF	50% RF	1% RF ($Mg(ClO_4)_2$)



Figur 9 Kop med prøvemne til bestemmelse af vanddamppermeabilitetskoefficienten.

3.3 Beregninger

3.3.1 Beregning af vanddamppermeabilitetskoefficienter

Under stationære forhold for fugttransport ind/ud af koppen kendes hældningen på kurven, der beskriver koppens masse som funktion af tiden. Med kendt eksponeringsareal for prøveemnet og kendt damptryk på prøveemnets to sider kan fugtmodstandstallet Z_p [Pa m^2 s / kg] beregnes ved hjælp af (2), (3) jf. /3/, /4/, /5/.

$$Z_p = \frac{A\,\Delta p}{\alpha} \tag{2}$$

$$= \frac{A\,p_s\,(RF_{mk} - RF_{kop})}{\alpha} \tag{3}$$

hvor	A	=	prøveemnets eksponeringsareal	[m^2]
	Δp	=	forskel i damptryk på prøveemnets to sider	[Pa]
	α	=	fugtstrøm, dvs. hældning på masse-tid kurven	[kg/s]
	p_s	=	mætningsdamptryk	[Pa]
	RF_{mk}	=	relativ luftfugtighed i målekammer	[-]
	RF_{kop}	=	relativ luftfugtighed i kop	[-]

Med kendt tykkelse af prøveemnet kan vanddamppermeabilitetskoefficienten δ_p [kg/(Pa m s)] beregnes som

$$\delta_p = \frac{L}{Z_p} \tag{4}$$

hvor L er prøveemnets tykkelse [m].

3.3.2 Korrektion for luftlagstykkelse og overgangsmodstande

I det følgende beskrives korrektion af Z_p og δ_p med hensyn til luftlag i koppen og overgangsmodstande på prøveemnets to sider, jf. /6/.

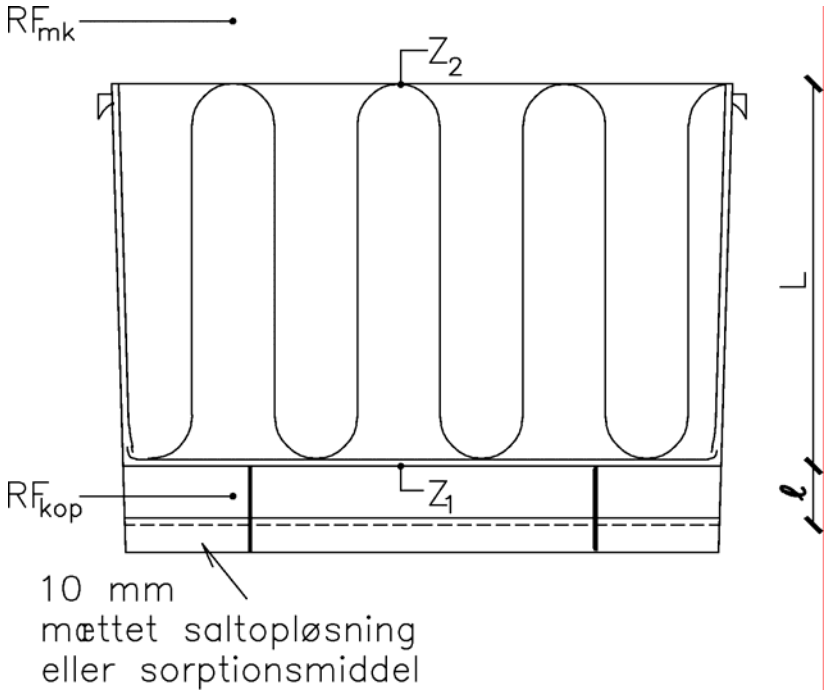
Formel (1) omskrives til

$$\alpha = \frac{A\,\Delta p}{Z_p} \quad \Rightarrow \tag{5}$$

$$q = \frac{\Delta p}{Z_p} \tag{6}$$

hvor q er fugtstrøm pr. arealenhed [kg/(s m^2)].

På figur 10 er vist en kop med overgangsmodstande Z_1 og Z_2 på prøveemnets to sider.



Figur 10 Kop med angivelse af overgangsmodstande Z_1 og Z_2 på prøveemnets to sider. L og l angiver prøveemnets tykkelse henholdsvis tykkelse af luftlaget i koppen. Principiel figur.

Zp i formel (2) - (6) er det totale, målte fugtmodstandstal bestående af bidrag fra selve emnet ($Z_{p,e}$), fra overgangsmodstande ved emnets over- og underside (Z_1, Z_2) samt fra modstanden af luftlaget i koppen (Z_a). Fugtstrømmen q kan udtrykkes som

$$q = \frac{\Delta p}{Z_{p,e} + Z_1 + Z_2 + Z_a} \tag{7}$$

Fugtmodstandstallet Z_a for et luftlag i koppen med tykkelsen l er $Z_a = l/\delta_a$ hvor δ_a er vanddamppermeabilitetskoefficienten i luft.

Overgangsmodstande kan findes vha. Lewis' lov, der udtrykker proportionaliteten mellem det konvektive varme- og fugtovergangstal, henholdsvis h_c og β_p, ved en grænseflade mod omgivende luft, /6/. Med anvendelse af det konvektive varmeovergangstal h_c fås det konvektive fugtovergangstal β_p [kg/(Pa s m^2)] til

$$\beta_p = \frac{h_c}{R_v\, T\, \rho\, c_p} \tag{8}$$

hvor

h_c	=	konvektivt varmeovergangstal	[W/(m^2 K)]
R_v	=	gaskonstant for vanddamp	[J/(kg K)]
ρ	=	luftens densitet	[kg/m^3]
c_p	=	luftens specifikke varmekapacitet	[J/(kg K)]
T	=	luftens temperatur	[K]

Her er $h_c = 5{,}56 + 3{,}89 \cdot v$ hvor v er lufthastigheden [m/s] ved den betragtede overflade. Ved beregningen af Z_1 og Z_2 regnes med stillestående luft i koppen ($v_1 = 0$ m/s) henholdsvis $v_2 = 2{,}1$ m/s. Overgangsmodstanden (Z_1 , Z_2) kan da beregnes som $Z = 1/\beta_p$. Med de angivne lufthastigheder fås $Z_1 = 0{,}026 \cdot 10^9$ (Pa s m^2) / kg og $Z_2 = 0{,}013 \cdot 10^9$ (Pa s m^2) / kg.

Den korrigerede vanddamppermeabilitetskoefficient $\delta_{p,e}$ [kg/(Pa m s)] for prøveemnet bliver således

$$\delta_{p,e} = \frac{L}{Z_{p,e}} \tag{9}$$

I BYG•DTUs kopudstyr måles løbende lufthastigheden v_2, temperatur og RF i målekammeret. De opsamlede klimadata samt vejedata for kopperne behandles med PC-programmet KOPLYSE3 /4/, der i den udskrevne rapport angiver ukorrigerede og korrigerede værdier for fugtmodstandstal og vanddamppermeabilitetskoefficient, jf. formel (2), (4), (7) og (9). De to udskrevne rapporter fra KOPLYSE3 kan ses som appendix C.

3.4 Måleresultater

I tabel 3 angives middelværdi og spredning for vanddamppermeabilitetskoefficienter (δ_p) med henholdsvis 94% RF (vådkop) og 1% RF (tørkop) i koppen, idet RF i målekammeret ligger omkring 50 %. δ_p-værdierne angives i tabel 3 såvel uden som med korrektion som beskrevet i afsnit 3.3.2. Som kopdiameter er anvendt 175 mm ved beregning af eksponeringsarealet.

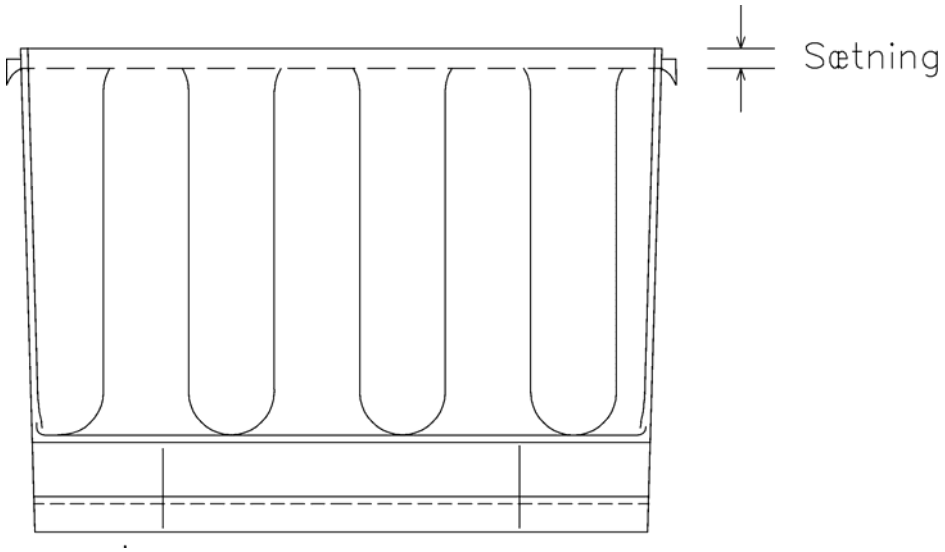
Materialet sætter sig lidt under forsøget. Sætning er vist principielt i figur 11. Størrelsen af sætningen i % af den oprindelige tykkelse er angivet i tabel 3.

Tabe1 3 Vanddamppermeabilitetskoefficienter ved 23 °C for våd- og tørkopforsøg for Papiruld imprægneret med ny formulering af imprægneringen.

Produkt	Densitet	Oprindelig tykkelse	Sætning under prøvning	RF-gradient	Forsøgstype	δ_p 10^{-12} kg / (Pa m s)	
						Værdier ifølge standard 1)	*Korrigerede værdier 2) ($\delta_{p,e}$)*
	[kg/m^3]	[mm]	[%]	[%]	Vådkop/tørkop		
Imprægneret Papiruld	40	152	8	50,7 – 94,0	Vådkop	151	171
Imprægneret Papiruld	40	152	9	50,7 – 94,0	Vådkop	149	168
Imprægneret Papiruld	40	152	11	50,7 – 94,0	Vådkop	152	172
					Middelværdi	151 ± 2	170 ± 2
Imprægneret Papiruld	40	152	8	50,9 – 1,0	Tørkop	155	176
Imprægneret Papiruld	40	152	8	50,9 – 1,0	Tørkop	155	177
Imprægneret Papiruld	40	152	7	50,9 – 1,0	Tørkop	165	189
					Middelværdi	158 ± 6	181 ± 7

Note:

- 1): Beregnet efter formel (3), jf. reference /3/, 2): korrigeret for luftlagstykkelse og overgangsmodstande, jf. formel (7) og (9)
- Værdier for δ_p er middelværdier ± spredning
- Luftlagstykkelse i koppen er 15 mm, lufthastighed over kopperne er 2,1 m/s



Figur 11 Sætning af materiale i kopforsøg. Principiel figur.

3.5 Diskussion

Kopmålingerne viser, at Papirulden er meget permeabel overfor vanddamp. I /7/ er der for Miljø Isolering –1 rapporteret ukorrigerede δ_p-værdier på $(177 \pm 27) \cdot 10^{-12}$ kg/(Pa m s) for vådkop- og $(190 \pm 34) \cdot 10^{-12}$ kg/(Pa m s) for tørkopforsøg. Disse værdier kan sammenlignes med de her målte δ_p-værdier på $(151 \pm 2) \cdot 10^{-12}$ kg/(Pa m s) for vådkop- og $(158 \pm 6) \cdot 10^{-12}$ kg/(Pa m s) for tørkopforsøg. De her målte værdier er lidt lavere end værdierne rapporteret i /7/ men er ikke afvigende spredningen på måleresultaterne taget i betragtning.

Der er konstateret sætning af materialet under forsøget på op til 11%. En sætning af materialet betyder i realiteten at permeabilitetetskoefficienten δ_p skal korrigeres for en gennemsnits-tykkelse under forsøget, idet permeabiliteten angives pr. tykkelsesenhed; denne korrektion er ikke udført i dette arbejde.

4. KAPILLARSUGNING

4.1 Formål

Formålet med kapillarsugningsforsøget er at bestemme vandopsugningsevne, vandindhold og sugehastighed for den undersøgte Papiruld med en ny formulering af imprægneringen. Forsøgene udføres så resultaterne kan sammenlignes med tidligere fundne måleresultater i /7/.

4.2 Fremgangsmåde

Kapillarsugningsforsøgene udføres efter LBM-prøvningsmetode 1 ”Kapillarsugning” /8/ med de afvigelser, der er beskrevet nedenfor.

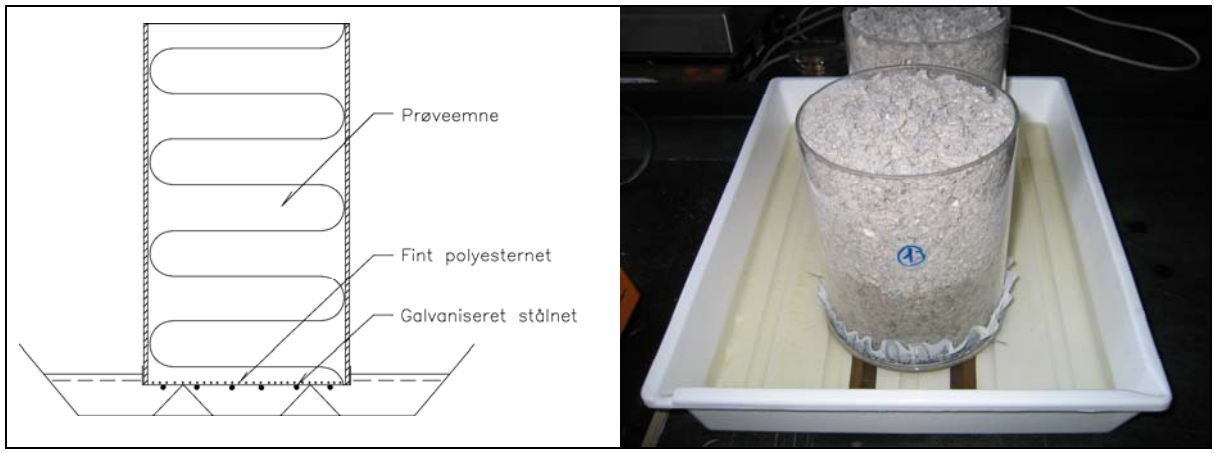
Måling af vandopsugningsevne sker med den på figur 12 viste opstilling. Opstillingen består af et plexiglasrør med højde 200 mm og indvendig diameter 144 mm. Bunden består af et galvaniseret stålnet med hulmål 4 mm x 4 mm, hvorpå der ligger et fint polyesternet med maskevidde 73 μm. Prøveemnet er et løsfyldprodukt. Der er ikke låg over røret for at forhindre fordampning. Sugefladen er placeret 10 mm nede i demineraliseret vand under måling. Med bestemte tidsintervaller vejes rør med prøveemne efter at metalnettet er aftørret med en fugtig klud.

Der gennemføres 3 parallelle forsøg. Klimaet i laboratoriet er 50 ± 5 %RF, 23 ± 1,5 ^{o}C under forsøgenes udførelse.

Plexiglasrør med 2 net vejes tomt hvorefter Papiruld placeres heri og konditioneres 1 dag i laboratoriet før målingen påbegyndes. Det konditionerede prøvelegemes masse bestemmes, m_o (plexiglasrør med prøveemne).

Sugefladen anbringes på afstandsholdere i kontakt med vand som ovenfor beskrevet og et ur startes.

Med passende tidsintervaller regnet fra kontakttidspunktet (for t = 1, 2, 4, 8, 16 og 32 min, og 1, 2, 4, 8, 24 timer og herefter 1 gang i døgnet) tages prøvelegemer op, aftørres og vejes (masse m_t). Kapillarsugningen er stoppet efter 20 dage.



Figur 12 Opstilling til måling af vandopsugningsevne for Papiruld.

4.3 Måling af vandindhold

Papirulden udtages i 4 lag parallelt med vandoverfladen fra to af rørerne. De fire lag tørres hver for sig, hvorefter et fugtprofil kan bestemmes. Papirulden tørres ved 40 ^{o}C aht. de tilsatte imprægneringsstoffer. Papirulden i det sidste rør udtages i 1 lag. Det enkelte lag identificeres ved positionen i forhold til vandoverfladen, hvorved ordinataksen på Figur 16 til afbildning af resultater starter ved -10 mm, jf. at sugefladen er placeret 10 mm nede i vandet.

For tørring ved 40 ^{o}C anvendes formel (10) til beregning af vandindhold

$$u = \frac{m_1 - m_{40}}{m_{40}} \cdot 100\% \qquad (10)$$

hvor	u	=	vandindhold	[vægt-%]
	m_1	=	prøveemnets masse ved afslutning af opsugning	[kg]
	m_{40}	=	prøveemnets masse efter tørring ved 40°C	[kg]

4.4 Bestemmelse af sugehastighed

Opsugningsmålingerne omregnes til opsuget masse per arealenhed (sugeflade) efter formlen

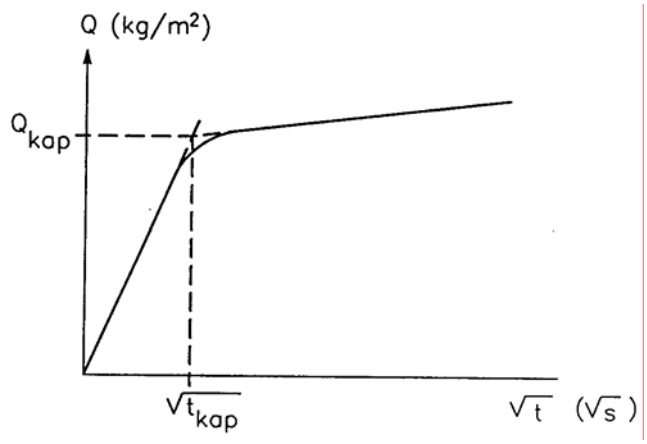
$$Q = \frac{m_t - m_o}{A} \qquad (11)$$

hvor	Q	=	opsuget masse per arealenhed	[kg/(m^2 sugeflade)]
	m_t	=	masse af prøve efter sugning til tiden t	[kg]
	m_o	=	masse af prøve efter konditionering	[kg]
	A	=	sugefladens areal	[m^2]

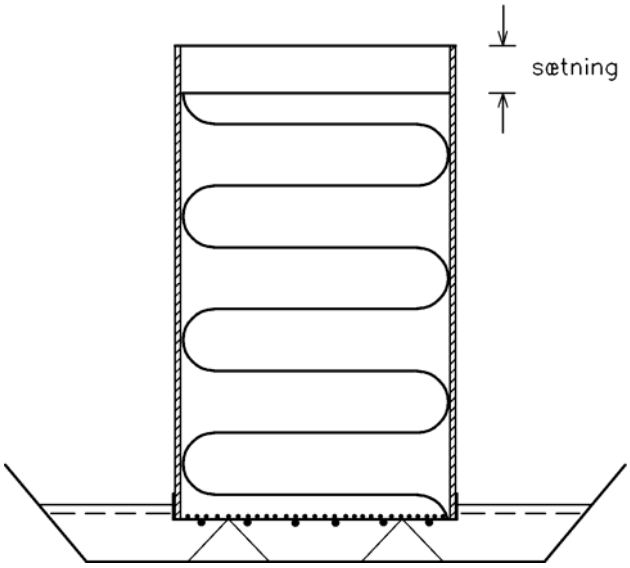
Q beregnes og afsættes i et diagram Q = $\sqrt{t}$, figur 13. I dette diagram indlægges to rette linier og skæringen fastlægger værdierne $\sqrt{t_{kap}}$ og Q_{kap}. Kapillaritetstallet – sugehastigheden – bestemmes som hældningskoefficienten i kurvens start

$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}} \qquad (12)$$

hvor	k	=	kapillaritetstallet	[kg/(m$^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$)]
	Q_{kap}	=	opsuget masse per arealenhed til tiden $\sqrt{t_{kap}}$	[kg/(m^2 sugeflade)]
	$\sqrt{t_{kap}}$	=	tiden til knækpunktsabsorptionen	[$\sqrt{\text{s}}$]



Figur 13 Metode til bestemmelse af kapillaritetstal k.



Figur 14 Sætning under kapillarsugning.

4.5 Det undersøgte produkt

I nedenfor viste tabel 4 er vist den anvendte densitet, sugefladens areal, prøveemnets højde og sætning under kapillarsugningen for det undersøgte produkt. Sætning under kapillarsugning er vist i figur 14.

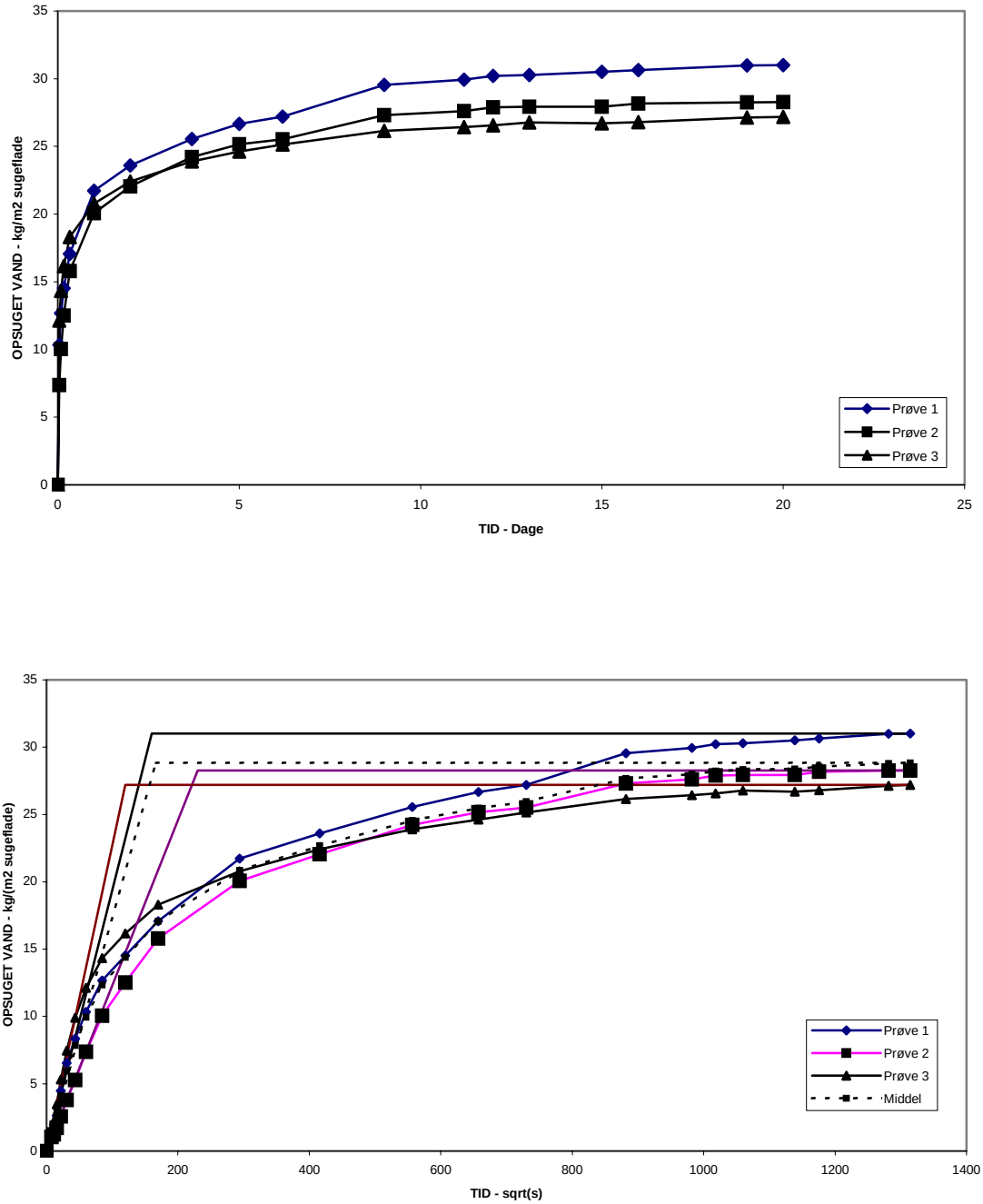
Tabel 4 Densitet, sugefladens areal, prøveemnets højde og sætning under kapillarsugning.

Produkt	Type	Densitet	Sugeflade	Prøveemne		Sugetid
				Højde	Sætning	
		[kg/m^3]	[m^2]	[m]	[m]	[dage]
Miljø Isolering	Løsfyldprodukt	40	0,016	0,20	0,02	20
			0,016	0,20	0,01	20
			0,016	0,20	0,02	20

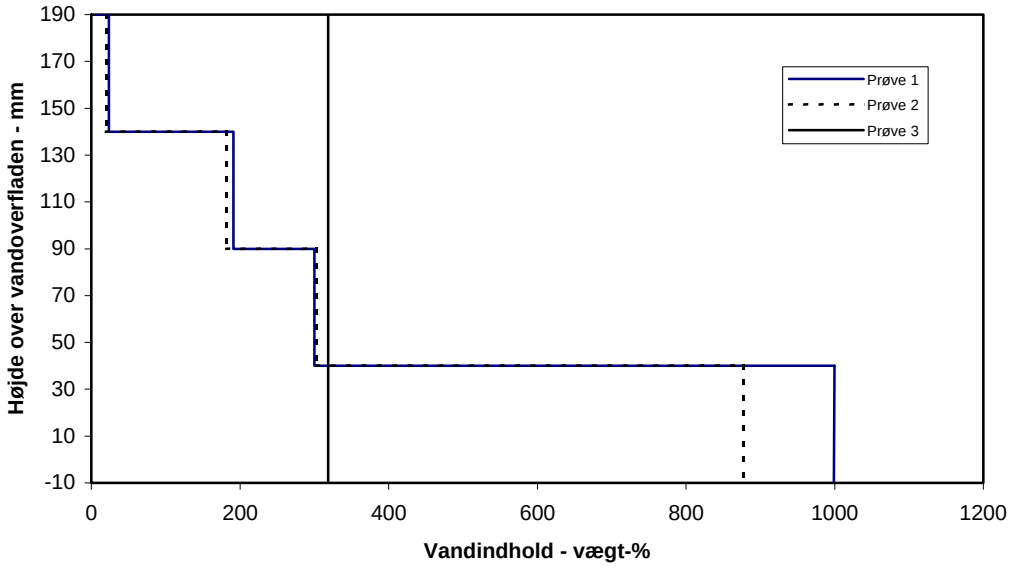
4.6 Måleresultater

Måleresultater fra kapillarsugning på Papiruld med densitet 40 kg/m^3 er vist i figur 15. På figur 15a er måleresultaterne vist med abcisse i [dage] og på figur 15b er måleresultaterne vist med abcisse i [$\sqrt{s}$]. Med de på figur 15b viste måleresultater for opsuget vand Q_{kap} og tid til knækpunktsabsorption $\sqrt{t_{kap}}$ er kapillaritetstallet k udregnet og vist i tabel 5.

Vandindholdet efter kapillarsugningens afslutning er bestemt i fire lag for Prøve 1 og Prøve 2, mens et middelvandindhold er bestemt for Prøve 3, figur 16. Tørretemperatur 40 °C.



Figur 15 Resultater fra kapillarsugningsforsøg med Papiruld med ny formulering af impræg-neringen. a: abcisse i [dage], b: abcisse i [$\sqrt{s}$].



Figur 16 Vandindhold efter tørring ved 40 °C.

Tabel 5 Opsuget vand, tid og kapillaritetstal for de tre prøver.

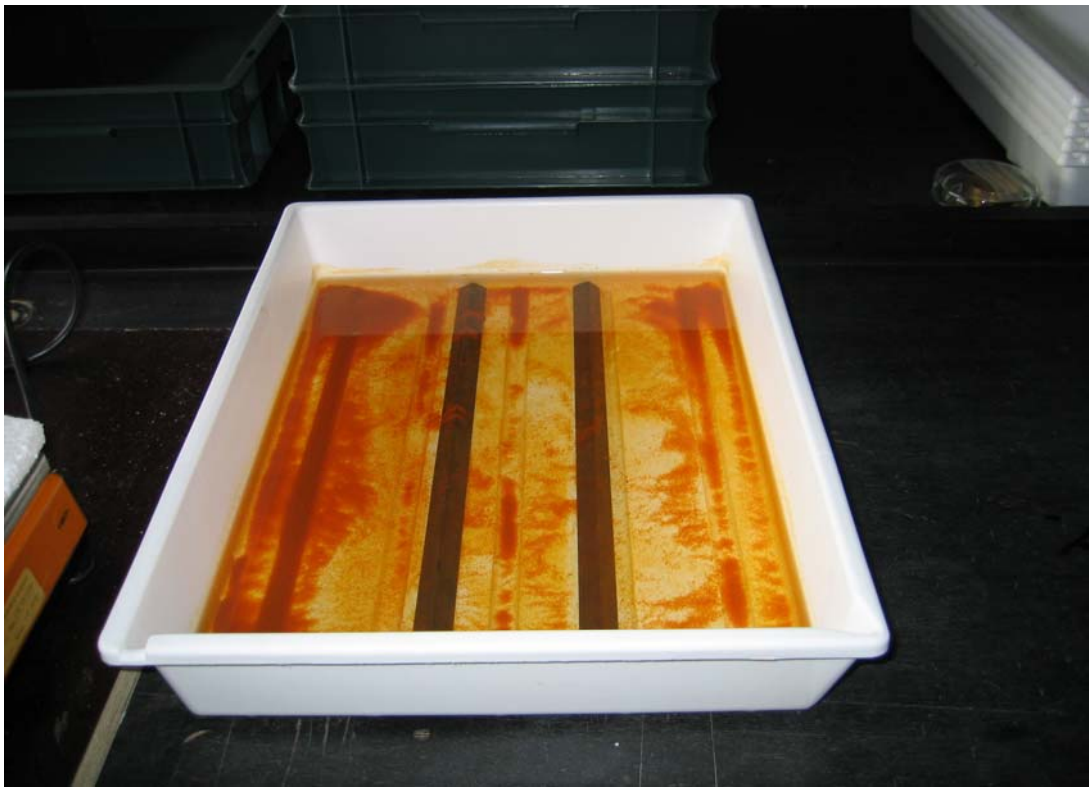
	Opsuget vand - Q_{kap}		Tid - $\sqrt{tkap}$	Kapillaritetstal - k	
	Prøveemne [kg/m^2]	Middel [kg/m^2]	[$\sqrt{s}$]	Prøveemne [kg/(m$^2\cdot\sqrt{s}$)]	Middel [kg/(m$^2\cdot\sqrt{s}$)]
Prøve 1	31,5		160	0,197	
Prøve 2	28,3		230	0,122	
Prøve 3	27,2	29	120	0,225	0,181

Tabel 6 Middelvandindhold efter tørring ved 40 °C.

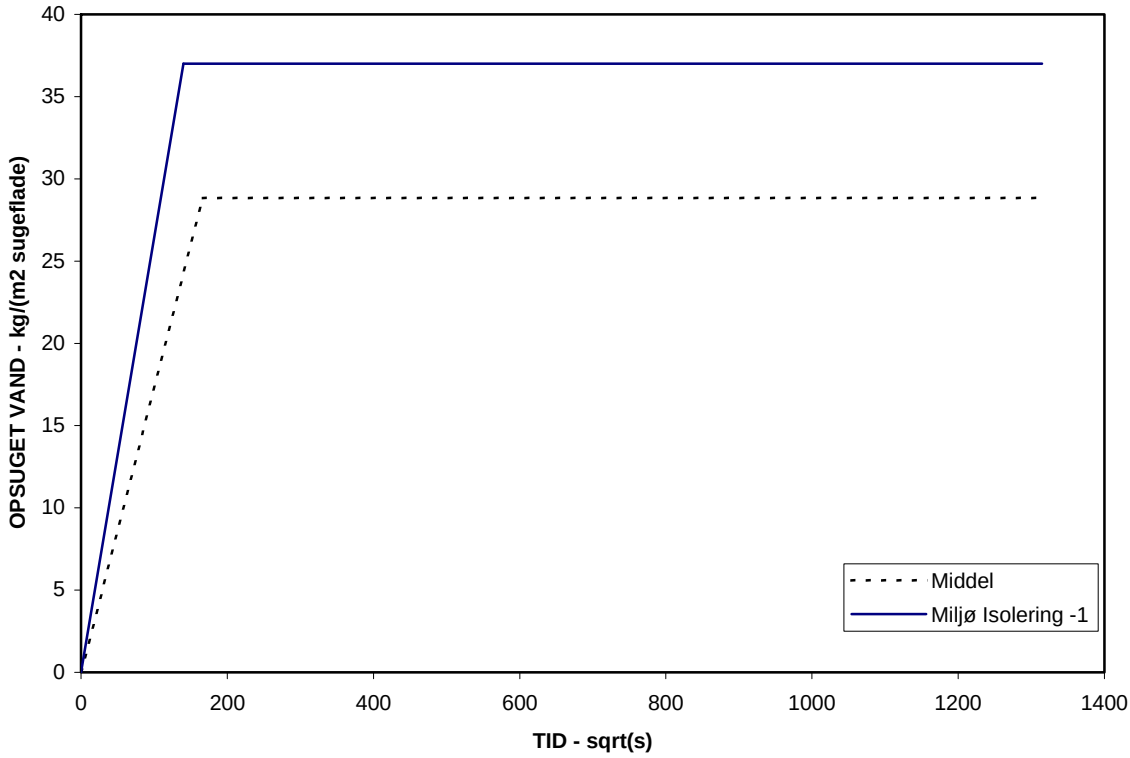
	Middelvandindhold	
	Prøveemne [vægt-%]	Middel [vægt-%]
Prøve 1	361	
Prøve 2	372	
Prøve 3	353	362

4.7 Diskussion

Ved afslutningen af kapillarsugningsmålingen var fugtfronten nået ca. 13 cm op, hvilket tydeligt kunne ses via en farveforskel i Papirulden. Der kunne desuden konstateres en ikke ubetydelig mængde rødbrunt bundfald i vandet i opsugningsbakken, se figur 17. Bundfaldet er ikke nærmere analyseret.



Figur 17 Ved afslutning af kapillarsugningsforsøget konstateres en ikke ubetydelig mængde rødbrunt bundaffald i vandet i opsugningsbakken.



Figur 18 "Middel" fra figur 15b (denne undersøgelse) og den tilsvarende middelkurve for Miljø Isolering –1 fra /7/.

Den her målte opsugede vandmængde i middel, kapillaritetstallet i middel og middelvandindholdet kan sammenlignes med de tilsvarende værdier for Miljø Isolering –1 rapporteret i /7/, tabel 7 og figur 18. Det ses, at de tre nævnte værdier bestemt i denne undersøgelse alle ligger lavere end rapporteret i /7/.

Tabel 7 Sammenligning med tidligere resultater.

	Denne undersøgelse	Miljø Isolering –1 i /7/
Opsuget vandmængde [kg/m^2]	29	37
Kapillaritetstal [kg/(m$^2 \cdot \sqrt{s}$)]	0,181	0,27
Middelvandindhold [vægt-%]	362	453

5. KONKLUSION

Sorptionsisotermer for Papiruld imprægneret med henholdsvis ny formulering af imprægneringen og eksisterende bor-imprægnering og for imprægneringsstofferne separat er målt i klimaskabsopstilling ved 20 °C. Op til 85 %RF er de målte vandtørstof-forhold ens for Papiruld imprægneret med henholdsvis ny formulering af imprægneringen og bor-imprægnering. Ved høje relative luftfugtigheder stiger den optagne vandmængde meget især for Papiruld imprægneret med den nye formulering af imprægneringen. Ved 95,4 %RF er vandtørstof-forholdet næsten dobbelt så stort for Papiruld imprægnet med ny formulering af imprægneringen i forhold til vandtørstof-forholdet for Papiruld imprægneret med bor-imprægnering. Dette skyldes det meget store vandtørstof-forhold for imprægneringsstofferne magnesiumsulfat og natrium benzoat; disse imprægneringsstoffer har begge en meget stor vandoptagelse. Ved RF større end 85% er det visuelt konstateret, at både magnesiumsulfat og natrium benzoat har optaget så meget vand, at de begge er overgået til flydende form. Problematikken omkring udvaskning af imprægneringsstoffer ved høj RF har ligget udenfor dette projekts rammer.

Kopmålingerne viser, at Papirulden er meget permeabel overfor vanddamp. I denne undersøgelse måles vanddamppermeabilitetetskoefficienter på $(151 \pm 2) \cdot 10^{-12}$ kg/(Pa m s) ved vådkop- og $(158 \pm 6) \cdot 10^{-12}$ kg/(Pa m s) ved tørkopforsøg. Der er konstateret sætning af materialet under forsøgene på op til 11% af den oprindelige tykkelse.

Kapillarsugningsforsøget viser en opsuget vandmængde i middel på 29 kg/m^2, et kapillaritetstal i middel på 0,181 kg/(m$^2 \cdot \sqrt{s}$) og et middelvandindhold på 362 kg/m^3. Ved afslutning af kapillarsugningsforsøget konstateres en ikke ubetydelig mængde rødbrunt bundfald i vandet i opsugningsbakken. Bundfaldet er ikke nærmere analyseret. Der er konstateret en sætning af materialet på 0,02 m svarende til 10% af starthøjden.

6. LITTERATUR

/1/ Strømdahl, K. (2000): Water Sorption in Wood and Plant Fibres. Ph.D.-thesis. Series R, No 78. Dept. og Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark.

/2/ EN ISO 12571 (1999): *Hygrothermal performance of building materials - Determination of hygroscopic sorption properties*. European Committee for Standardization.

/3/ EN ISO 12572 (2001). *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties*. European Committee for Standardization.

/4/ Mullit, P. (1993): *KOPLYSE ver.3.0. Program til analyse af måleresultater opsamlet i KOP-udstyr*. Teknisk Rapport 297/93, Lab. for Bygningsmaterialer, DTH.

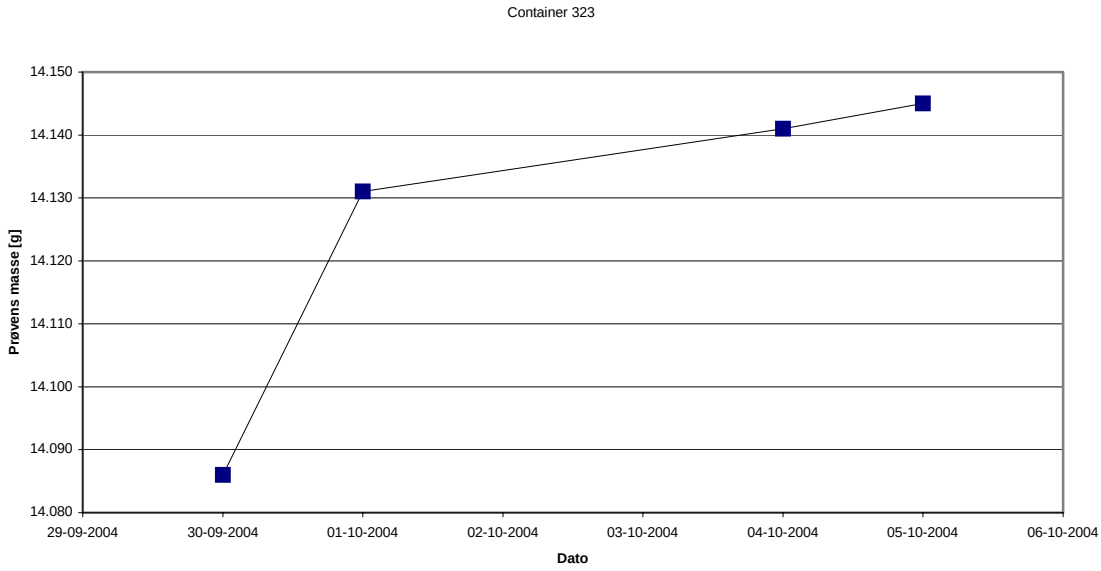
/5/ Hansen, K.K. (1989): *Equipment for and results of water vapour transmission tests using cup methods.* Proc. ICHMT Symp. "Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures". September 4-8, Dubrovnik, Yugoslavia.

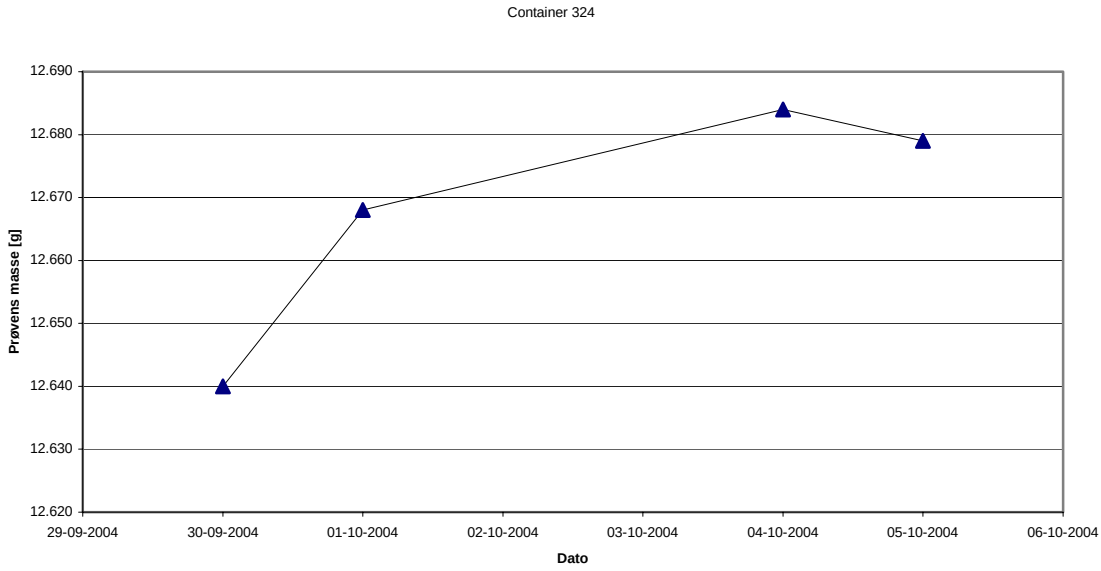
/6/ Hansen, K.K. and Lund, H.B. (1990): *Cup method for determination of water vapour transmission properties of building materials. Sources of uncertainty in the method.* Proc. 2nd Symp. Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, 20-22 Aug 1990. pp. 291-298.

/7/ Hansen, K.K.; Hansen, E.J. de Place; Padfield, T.; Rode, C. og Kristiansen, F.: Hovedrapport for *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Serie R No 62, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer og Rapport SR-0003, Institut for Bygninger og Energi, DTU. 1999.

/8/ LBM-prøvningsmetode 1: Kapillarsugning. 170189 CBN:sl. Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby, 1989.

Appendix A – Indsvingning til ligevægt under adsorption ved 85 %RF for Papiruld imprægneret med ny formulering af imprægneringen.





Appendix B - Sorption - ligevægtsfugtindhold (u) [vægt-%]

%RF	Alun	MgSO4	Na-benz.	Imprægneret Papiruld		Imprægneret Papiruld	
				Bor	Bor	Ny impr.	Ny impr.
55	0,37	27,54	3,80	5,80	5,59	8,82	8,52
85	0,58	28,23	10,49*	12,89	12,78	14,65	14,66
93	0,79	65,82*	59,40*	20,33	20,49	35,86	33,98
95,4	1,25	104,37*	103,42*	28,96	29,58	54,81*	53,86
93	0,73	127,67	137,04*	22,75	23,30	36,98*	33,46
85	0,52	105,21*	130,66*	14,48	14,42	18,65	18,02*
55	0,34	47,99*	71,27*	6,96*	6,72*	7,34*	7,21*

* = ikke i ligevægt ved skift af RF.

Apendiks C - Vanddamppermeabilitetsmåling. Udskrevne rapporter fra KOPLYSE3 fra vådkop- og tørkopforsøg.

BYG·DTU · Danmarks Tekniske Universitet

Dept. of Civil Engineering · Technical University of Denmark

Brovej, Bygning 118 · DK-2800 Kgs. Lyngby
Telefon 45 25 17 00

11.OKT.2004

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Rekvirent : Miljø Isolering

Kontaktperson : Hans Dollerup

Forsøgsleder : KKH

Laborant : BR

Periode : 22.09-24.09 2004

LBMnummer : Serie 403

Prøvekammer : Temp.middel (°C) : 23.03
RF-middel (%) : 50.68
v_luft middel(m/s): 2.09
Atm.middel (hPa) : 961.54
Det angivne klima i prøvekammeret er middelværdier.

Eff.areal (mm²) : 24053.00

Fugtmodstandstal

$Zp = A \cdot dp/\alpha$ (Pa·s·m²/kg)

$Zc = Zp/(462*T)$ (s/m)

dp: Damptryksforskel over prøveemne.
α : Hældningen af vægtændringskurven.
A : Areal af prøveemne.
T : Temperatur i Kelvin.

Diffusivitet

$\delta p = L/Zp$ (kg/Pa·s·m)

$Dc = 462 \cdot T \cdot \delta p$ (m²/s)

L : Tykkelse af prøveemne.

Kommentarer:

Prøvning udført i henholdt til LBM TR 179/88 (udstyr) og LBM TR 298/94 (beregningsprogram)
Luftlag i kop (mm): 15.00

Forsøgsleder : Kurt Kielsgaard Hansen
KKH

Data for de enkelte kopper findes på næste side.

BYG·DTU · Danmarks Tekniske Universitet

Dept. of Civil Engineering · Technical University of Denmark

Brovej, Bygning 118 · DK-2800 Kgs. Lyngby
Telefon 45 25 17 00

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RF i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	·10⁹ Pa·s·m²/kg	s/m	·10⁻⁹ kg/Pa·s·m	·10⁻⁹ m²/s
1	Imp. Papiruld	152.00	94.00	1.006180	7353.11	0.15107	20671.5
2	Imp. Papiruld	152.00	94.00	1.022066	7469.21	0.14872	20350.2
3	Imp. Papiruld	152.00	94.00	1.002083	7323.17	0.15168	20756.0

Bemærkninger:
Værdier er ukorrigerede.

Datafiler: SERIE403.DAT , SERIE403.REC , Dato: 11.OKT.2004

BYG·DTU · Danmarks Tekniske Universitet

Dept. of Civil Engineering · Technical University of Denmark

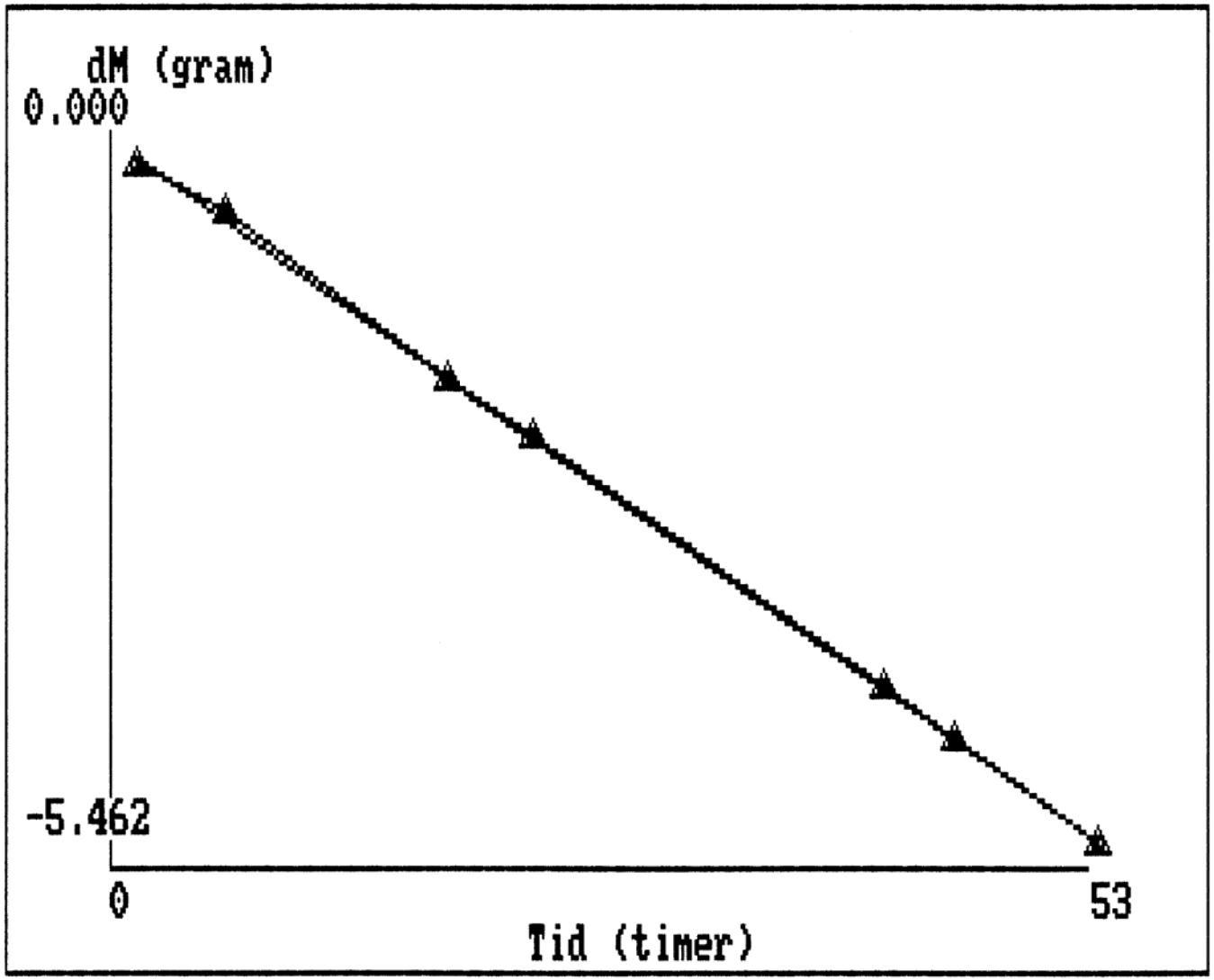
Brovej, Bygning 118 · DK-2800 Kgs. Lyngby
Telefon 45 25 17 00

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RF i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	·10⁹ Pa·s·m²/kg	s/m	·10⁻⁹ kg/Pa·s·m	·10⁻⁹ m²/s
1	Imp. Papiruld	152.00	94.00	0.888527	6493.31	0.17107	23408.7
2	Imp. Papiruld	152.00	94.00	0.904417	6609.43	0.16806	22997.4
3	Imp. Papiruld	152.00	94.00	0.884428	6463.36	0.17186	23517.2

Bemærkninger:
Værdier ovenfor er rene
Materialeværdier.
der er korrigeret for "Masked-Edge-Effect",
Luftlagstykkelse og Overgangsmodstande på prøvens to sider.

Datafiler: SERIE403.DAT , SERIE403.REC , Dato: 11.OKT.2004



Kop nr. 1
Imp. Papiruld

	Antal
▪ Målepunkt	7
△ Analyseret	7

100*a = -0.1750
b = 0.0700
KorrKoef = -0.9999

Zp = 1.006
(GPa s m**2/kg)

11.OKT.2004, 21.02

Prt Scr: Udskriv billedet på printer F6/Mellemrum: Returner

BYG·DTU · Danmarks Tekniske Universitet

Dept. of Civil Engineering · Technical University of Denmark

Brovej, Bygning 118 · DK-2800 Kgs. Lyngby
Telefon 45 25 17 00

11.OKT.2004

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Rekvirent : Miljø Isolering

Kontaktperson : Hans Dollerup

Forsøgsleder : KKH

Laborant : BR

Periode : 27.09-30.09 2004

LBMnummer : Serie 404

Prøvekammer : Temp.middel (°C) : 23.03
RF-middel (%) : 50.90
v_luft middel(m/s): 2.11
Atm.middel (hPa) : 970.92
Det angivne klima i prøvekammeret er middelværdier.

Eff.areal (mm²) : 24053.00

Fugtmodstandstal

$Zp = A \cdot dp/\alpha$ (Pa·s·m²/kg)

$Zc = Zp/(462*T)$ (s/m)

dp: Damptryksforskel over prøveemne.
α : Hældningen af vægtændringskurven.
A : Areal af prøveemne.
T : Temperatur i Kelvin.

Diffusivitet

$\delta p = L/Zp$ (kg/Pa·s·m)

$Dc = 462 \cdot T \cdot \delta p$ (m²/s)

L : Tykkelse af prøveemne.

Kommentarer:

Prøvning udført i henholdt til LBM TR 179/88 (udstyr) og LBM TR 298/94 (beregningsprogram)
Luftlag i kop (mm): 15.00

Forsøgsleder : Kurt Kirkegaard Hansen
KKH

Data for de enkelte kopper findes på næste side.

BYG·DTU · Danmarks Tekniske Universitet

Dept. of Civil Engineering · Technical University of Denmark

Brovej, Bygning 118 · DK-2800 Kgs. Lyngby
Telefon 45 25 17 00

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RF i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	·10⁹ Pa·s·m²/kg	s/m	·10⁻⁹ kg/Pa·s·m	·10⁻⁹ m²/s
1	Imp. Papiruld	152.00	1.00	0.981032	7169.38	0.15494	21201.3
2	Imp. Papiruld	152.00	1.00	0.978743	7152.65	0.15530	21250.9
3	Imp. Papiruld	152.00	1.00	0.922837	6744.10	0.16471	22538.2

Bemærkninger:
Værdier er ukorrigerede.

Datafiler: SERIE404.DAT , SERIE404.REC , Dato: 11.OKT.2004

BYG·DTU · Danmarks Tekniske Universitet

Dept. of Civil Engineering · Technical University of Denmark

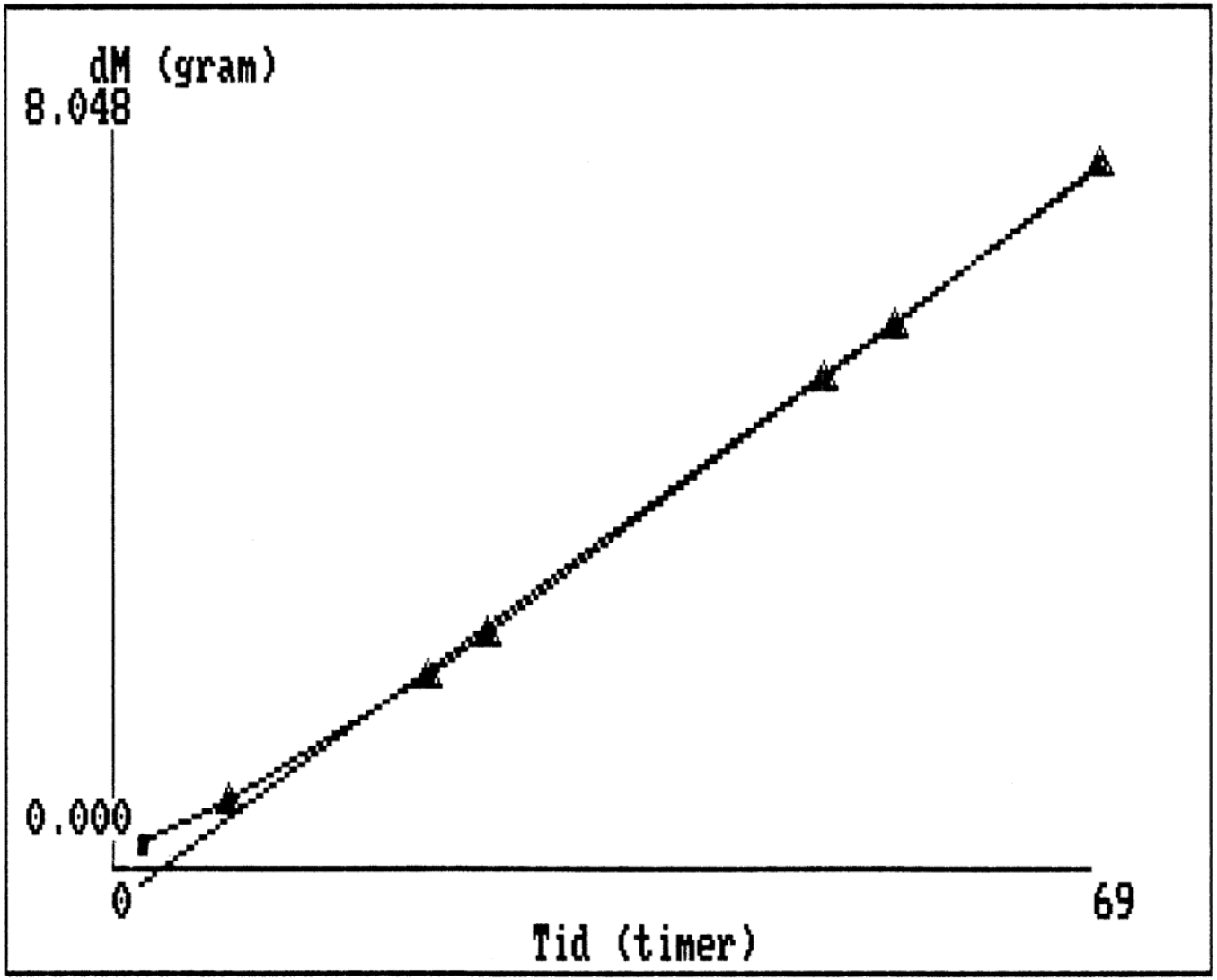
Brovej, Bygning 118 · DK-2800 Kgs. Lyngby
Telefon 45 25 17 00

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RF i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	·10⁹ Pa·s·m²/kg	s/m	·10⁻⁹ kg/Pa·s·m	·10⁻⁹ m²/s
1	Imp. Papiruld	152.00	1.00	0.863445	6310.06	0.17604	24088.5
2	Imp. Papiruld	152.00	1.00	0.861156	6293.32	0.17651	24152.6
3	Imp. Papiruld	152.00	1.00	0.805237	5884.67	0.18876	25829.8

Bemærkninger:
Værdier ovenfor er rene
Materialeværdier.
der er korrigeret for "Masked-Edge-Effect",
Luftlagstykkelse og Overgangsmodstande på prøvens to sider.

Datafiler: SERIE404.DAT , SERIE404.REC , Dato: 11.OKT.2004



Kop nr. 1
Impræg. Papiruld

	Antal
▪ Målepunkt	7
△ Analyseret	6

100*a = 0.2067
b = -0.5438
KorrKoef = 0.9996

Zp = 0.981
(GPa s m**2/kg)

11.OKT.2004, 20.14

Prt Scr: Udskriv billedet på printer F6/Mellemrum: Returner