

Sorptionsisotermier

Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser
af alternative isoleringsmaterialer



ERNST JAN DE PLACE HANSEN

KURT KIELSGAARD HANSEN

Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer
Danmarks Tekniske Universitet



Sorptionsisotermer

Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser
af alternative isoleringsmaterialer

Ernst Jan de Place Hansen
Kurt Kielsgaard Hansen

December 1999

Sorptionsisotermer
Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser
af alternative isoleringsmaterialer

Tryk: DTU-tryk

Kgs. Lyngby

ISBN 87-7740-263-4

ISSN 1396-2167

Electronic Publication

www.bkm.dtu.dk

SORPTIONSISOTERMER

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 Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM) og Institut for Bygninger og Energi (IBE), DTU. De øvrige rapporter omhandler

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

Den foreliggende rapport omhandler målinger af sorptionsisotermer.

Lyngby, 13. december 1999
Ernst Jan de Place Hansen

Sammenfatning

Sorptionsisotermer for alternative og traditionelle isoleringsprodukter er bestemt ved 20°C og 40°C ved brug af to forskellige forsøgsopstillinger. I klimaskab styres den relative fugtighed ved tør og fugtig luft tilført skabet, i eksikkatorer styres den relative fugtighed ved mættede saltopløsninger. Ved 20°C er med klimaskabsopstilling målt på to typer perlite (ekspanderet vulkansk aske) fra Nordisk Perlite, fem typer af papirisolering (to typer fra Ekofiber, to typer fra Miljø Isolering, en type fra Isodan), en type af fåreuld (Herawool) og en type af hør (Heraflax) samt to typer af mineraluld fra henholdsvis Glasuld og Rockwool. Ved 40°C er målt på en type fåreuld og to typer papirisolering (Ekofiber, Miljø Isolering) med eksikkatoropstilling og en type papirisolering (Ekofiber) med klimaskabsopstilling. Adsorptionsisotermer for rene salte fra produkterne er bestemt ved 21°C. De opnåede resultater er sammenlignet med resultater fra litteraturen for Leca samt for mineralulds- og papirisoleringsprodukter.

Indholdsfortegnelse

1	Formål	1
2	Fremgangsmåde	1
2.1	Sorptionsisotermer ved 20°C og 40°C - klimaskabsopstilling	1
2.1.1	Klimaskabsopstilling	
2.1.2	Forsøgsbeskrivelse	
2.2	Sorptionsisotermer ved 21°C og 40°C - ekssikkatoropstilling	4
2.2.1	Ekssikkatoropstilling	
2.2.2	Forsøgsbeskrivelse	
2.3	Ligevægtsvandindholdet	5
3	Undersøgte produkter	6
4	Måleresultater	7
4.1	Klimaskabsopstilling ved 20°C	7
4.2	Øvrige undersøgelser	10
5	Diskussion	11
5.1	Sorptionsisotermer ved 20°C	11
5.2	Tilsætnings af salte - indvirkning på sorptionsegenskaber	12
5.3	Sorptionsisotermer - temperaturafhængighed	14
5.4	Ligevægtsvandindhold - betydning af tørremetode	15
6	Konklusion	15
7	Litteratur	16
Appendix A	Sorptionsisotermer for hver enkelt produkt	6 sider
Appendix B	Sorption - ligevægtsvandindhold (u) [vægt%]	6 sider
Appendix C	Indsvingning til ligevægt - eksempel	2 sider
	Eksempel på klimaet i klimaskabsopstilling	1 side
Appendix D	Sorptionsisotermer fra litteraturen	4 sider

SORPTIONSISOTERMER

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. Den foreliggende rapport omhandler målinger af sorptionsisotermer for alternative og traditionelle isoleringsprodukter.

2. Fremgangsmåde

Sorptionsisotermer er i dette projekt bestemt ved to forskellige temperaturer, 20°C og 40°C. Hertil benyttes to forskellige forsøgsopstillinger, der beskrives i det følgende.

2.1 Sorptionsisotermer ved 20°C og 40°C - klimaskabsopstilling

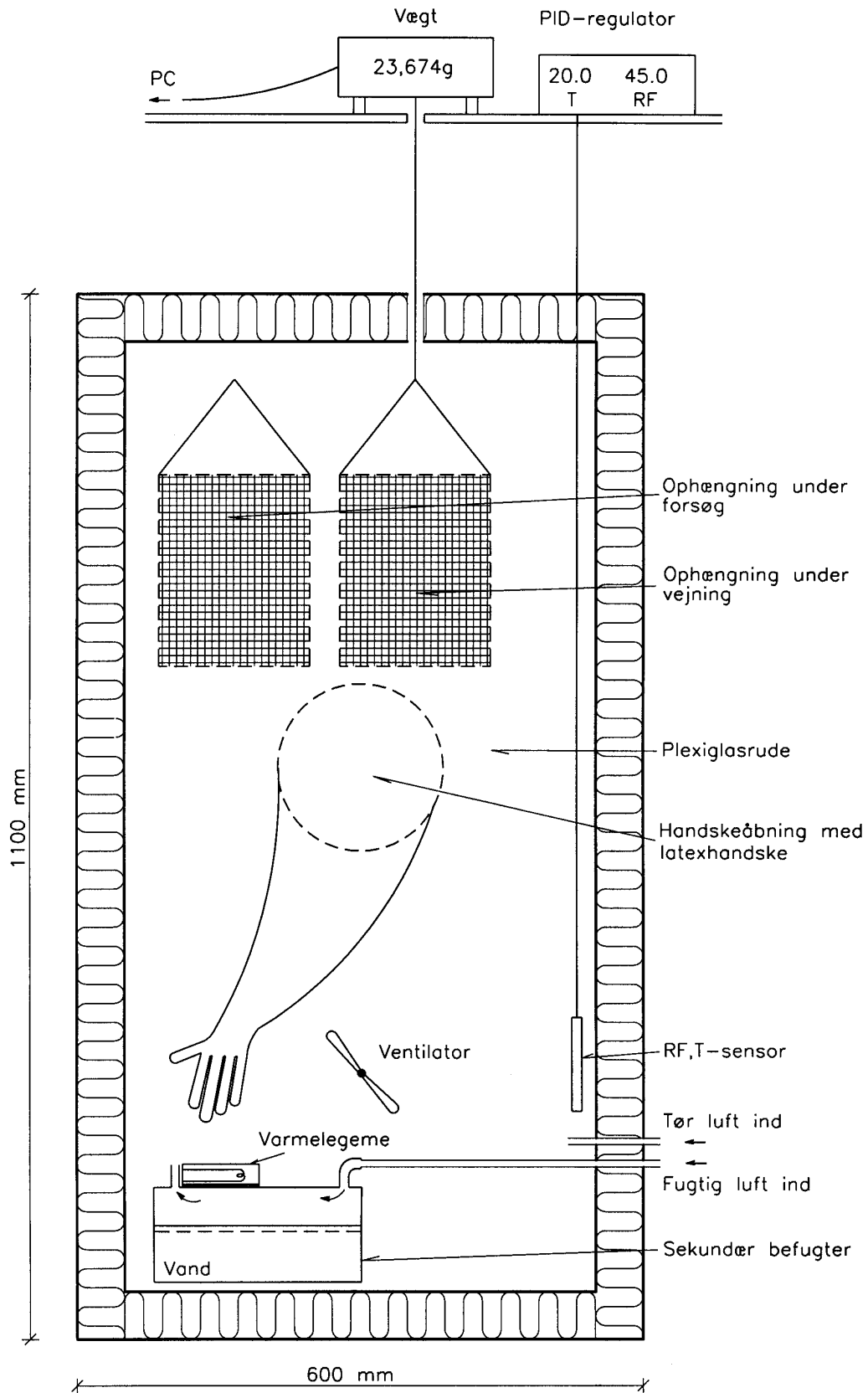
2.1.1 Klimaskabsopstilling

Måling af sorptionsisotermer er sket i BKM's netop færdiggjorte klimaskabe, 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 SorpVej /3/.

Figur 1 og 2 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 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 løsfyldprodukter eller sammenhængende materiale, 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 antydnet på figur 1.



Figur 1 Klimaskabsopstilling til bestemmelse af sorptionsisotemer ved 20°C.



Figur 2 Klimaskabsopstilling på BKM til bestemmelse af sorptionsisotermer. De to klimaskabe til venstre benyttes til forsøg ved 20°C. Klimaskabet til højre benyttes til forsøg ved andre (højere) temperaturer, i det aktuelle tilfælde ved 40°C.

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. Til bestemmelse af sorptionsisotermer ved 40°C benyttes skabet til højre på figur 2. Et skab inde i skabet gør det muligt at opretholde en højere temperatur end 20°C . Ved 40°C varierer temperaturen $\pm 0.5^\circ\text{C}$, mens en ønsket RF kan opretholdes med $\pm 0.3\text{-}3\%$ RF, med størst nøjagtighed ved lave RF. Prøven er som ved 20°C anbragt i en pose af fintmasket polyesternet, men vejningen udføres helt automatisk vha. stepmotorer og vægt og skabet er derfor uden handskeåbning.

2.1.2 Forsøgsbeskrivelse

Klimaskabet bringes i ligevægt ved 3% RF og 20°C (40°C) vha. sætpunkter (RF, temperatur) valgt på PID-regulatoren. Datafil og prøveemner (poser) oprettes i SorpVej. Poser nummereres så numrene ses tydeligt gennem ruden og placeres i klimaskabet.

Før vejning ved 20°C stoppes anlægget. Herved frigøres vægten ved hjælp af en luftcylinder. De tomme poser vejes vha. SorpVej, der har en indbygget kalibreringsrutine for vægten. En passende mængde afvejes. Materialet fyldes i de respektive poser, hvorefter disse vejes og tørres til ligevægt ved 3% RF i klimaskabet. RF ændres og ny datafil oprettes, når materialerne er bragt i fugtmæssig ligevægt med den omgivende luft. Vejning ved 40°C sker automatisk, som beskrevet i afsnit 2.1.1. Indsvingning til ligevægt er beskrevet i afsnit 2.3.

Først bestemmes adsorptionsisotermer, dernæst desorptionsisotermer. Da en decideret udtørring af materialet, fx. i et tørreskab (ovn) kan risikere at ødelægge materialet eller påvirke eventuelle tilsætningsstoffer, udføres dette normalt 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 over magnesiumperchlorat svarende til 1% RF er den mest skånsomme metode for de tilsatte salte i produkterne.

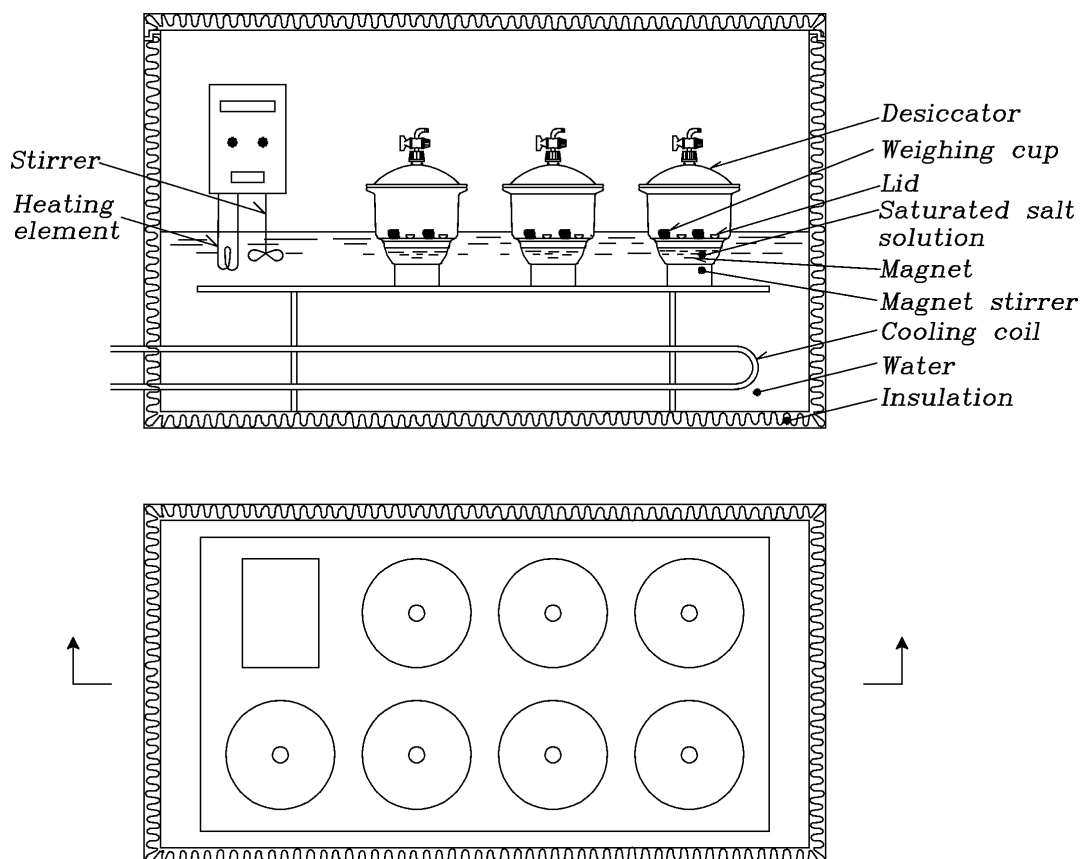
I forbindelse med bestemmelse af sorptionsisotermer ved 20°C er tørring til ligevægt sket på flere måder. Først i en eksikkator over magnesiumperchlorat ($Mg(ClO_4)_2$) ved 20°C svarende til 1% RF, derefter i et tørreskab ved 70°C og til slut ved 105°C, for at se hvor stor indvirkning det får på størrelsen af vandindholdet, beregnet ud fra de udførte vejninger. Tørringen er i hvert tilfælde forløbet over 10-14 dage med kontrolvejninger undervejs.

Ved forsøg ved 40°C sker tørring ved 3% RF i klimaskabet i 17 dage inden bestemmelsen af sorptionsisotermer påbegyndes. Der foretages ikke yderligere tørring efterfølgende.

2.2 Sorptionsisotermer ved 21°C og 40°C - eksikkatoropstilling

2.2.1 Eksikkatoropstilling

Der er bestemt sorptionsisotermer med eksikkatoropstilling ved 21°C og 40°C vha. BKM's termostatstyrede vandkar. Princippet i opstillingen fremgår af figur 3.



Figur 3 Eksikkatoropstilling til bestemmelse af sorptionsisotermer ved 21°C og 40°C.

Prøverne anbringes i små vejglas. Disse placeres i eksikatorer, der indeholder hver sin mættede saltopløsning, svarende til en bestemt RF. For hver RF benyttes 3 prøver pr. materiale pga. prøvestørrelsen (mindre end 2 gram). Ved vejning skal vejglassene flyttes fra eksikatorerne til en ekstern vægt. Ved åbningen af eksikatorerne benyttes et plasttelt med handskeåbninger ved forsøg ved 40°C for at minimere fugtudveksling med omgivelserne. Den nødvendige temperatur og RF i teltet etableres forinden vha. en varmer og skåle med vand eller magnesiumperchlorat. Opsamlingen af vejninger sker via programmet SorpVej /3/.

2.2.2 Forsøgsbeskrivelse

Datafil og vejglas oprettes i SorpVej svarende til det antal mættede saltopløsninger, der benyttes til bestemmelse af sorptionsisotermen. Det kontrolleres at vandkarret har en temperatur på $21(40) \pm 0.2^\circ\text{C}$. De tomme vejglas vejes, hvorefter en passende mængde anbringes i de respektive glas og vejes. Glas med materiale tørres over magnesiumperchlorat i 7 dage indtil masselivevægt. Herefter anbringes vejglas med materiale i eksikatorer, der forinden er blevet forsynet med forskellige mættede saltopløsninger, svarende til forskellige relative fugtigheder. Der udføres således parallelle målinger på separate prøveemner. Vejglassenes låg skråtstilles for at muliggøre fugtudveksling mellem prøveemne og saltopløsning.

Ekssikatorerne anbringes herefter i vandkarret. Vejglassene vejes løbende indtil masselivevægt, hvorefter forsøget afsluttes og livevægtsvandindholdet bestemmes. Ved åbning af eksikatorer i forbindelse med vejning ved forsøg ved 40°C benyttes det klimatiserede plasttelt beskrevet ovenfor. En eksikator overføres fra vandkarret og åbnes i teltet, hvorefter låg lægges på vejglassene. Vejglassene kan herefter overføres til vægten, som står udenfor teltet.

2.3 Livevægtsvandindholdet

Kriteriet for indsvingning til livevægt er nærmere beskrevet i /3/. Det baserer sig på et matematisk udtryk til beskrivelse af livevægtsindsvingningen, og forudsætter mindst 4 målinger ved den aktuelle RF-værdi for at de indgående konstanter kan fastlægges. Når der indgår mindst 5 vejninger i beregningen af det matematiske udtryk bestemmes en delta-værdi, der til tiden t_{max} ($t_{max} = 2 \times \text{tiden til sidste vejning}$) angiver den øgede præcision af udtrykket ved at inddrage estimerede asymptoteværdier for massen ved fugtlivevægt i beregningerne. Delta-værdien er således forskellen mellem de to sidste asymptoteværdier sat i forhold til massen ved den fugtlivevægt som er estimeret ved den sidste af de to asymptoteværdier.

I dette projekt er foretaget mindst 5 vejninger med mindst 12 timers mellemrum mellem 2 vejninger ved den aktuelle RF-værdi. Som livevægtskriterium er anvendt en delta-værdi på ± 0.005 . Et taleksempel til illustration af ovenstående findes i appendix C: Svarende til indsvingningskurven (figur C1) gælder at $M_{livevægt}$ estimeres til 49.431 g på basis af 4 målinger ved 94% RF, mens estimatet på basis af 5 målinger bestemmes til 49.422 g, dvs. en ubetydelig ændring. Indsvingningskurver efter 4 og 5 målinger findes i appendix C. Efter 5 målinger bestemmes en delta-værdi på 0.0001, i dette tilfælde altså langt under kriteriet på 0.005. At 5 målinger er tilstrækkeligt til at fastlægge livevægtsværdien ses også af, at indsvingningskurven forløber næsten helt vandret efter 5 målinger.

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. Undersøgte produkter

Tabel 1 giver en oversigt over de undersøgte produkter. Produkterne angives ved deres kaldenavn. I øvrigt henvises til afsnit 2 i /4/. Der bestemmes ad- og desorptionsisotermer ved 20°C vha. klimaskabsopstillingen for produkterne i tabel 1 samt adsorptionsisotermer for Ekofiber Vind, Miljø Isolering -1 og Herawool vha. ekssikkator-opstillingen ved 40°C. Endelig er adsorptionsisotermerne for Ekofiber Vind bestemt ved 40°C med klimaskabsopstilling.

Tabel 1 Oversigt over undersøgte produkter.

Produkt (kaldenavn)	Beskrivelse	Type ¹ og størrelse	Masse ² [g]
Perlite SC (behandlet)	Ekspanderet vulkansk aske	L	47.5
Perlite (ubehandlet)	Ekspanderet vulkansk aske	L	49.2
Ekofiber Vind	Papiruld + 18vægt% borsalte	L	19.7
Ekofiber Væg	Papiruld + 5% borsalte	L	17.7
Miljø Isolering -1	Papiruld + 6% borsalte + 9% aluminiumhydroxid	L	25.6
Miljø Isolering -2 (u. salte)	Papiruld	L	27.3
Miljø Isolering - SBI ³	Som Miljø Isolering -1	L	18.3
Isodan	Papiruld + 6% borsalte + 9% aluminiumhydroxid	L	39.9
Herawool NF 040 ^{3,4}	Fåreuld + 2-4% borsalte + 1% urea	S 18x13x2 cm	7.6
Heraflax SF 040 ^{3,5}	Hør + 8% ammoniumfosfat/sulfat	S 19x12x2 cm	11.3
Rockwool A-batt	Mineraluld	S 18x11x2 cm	14.9
Glasuld 39 ⁵	Mineraluld	S 19.5x12x2 cm	9.7

Note:

- 1) Her angives enten L = løsfyldprodukt eller S = sammenhængende materiale
- 2) Den angivne masse er bestemt efter tørring over magnesiumperchlorat i forbindelse med klimaskabsopstilling ved 20°C
- 3) Prøveemner stammer fra materiale skaffet hos SBI, da Heraflax og Herawool ikke var leveret til DTU på det tidspunkt målingerne blev sat i gang. Desuden undersøges en prøve af SBI's leverance fra Miljø Isolering, mærket Miljø Isolering - SBI
- 4) Uden støttestreber
- 5) Leveres som rullevarer

Tabel 2 giver en oversigt over de undersøgte salte der findes i produkterne. En separat undersøgelse af de benyttede salte er foretaget for at studere deres indflydelse på produkternes sorptionsisotermer. Dette sker vha. ekssikatoropstillingen ved 21°C.

Tabel 2 Beskrivelse af undersøgte salte ved 21°C.

Navn	Kemisk sammensætning	Krystallisationspunkt	Renhed af salt
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	98% RF	1)
Borsyre	H_3BO_3	98% RF	Analyseware, min. 98%
Aluminiumhydroxid	$\text{Al}(\text{OH})_3$	intet	Analyseware min. 99.8%
Ammoniumfosfat/sulfat	3)	3)	2)

Note:

- 1) Købt på apotek. Europæisk Pharmacopee
- 2) Leveret som væske fra producent (Heraklith, Tyskland). Krystaller inddampet på BKM
- 3) Der fulgte ikke oplysninger med mht. kemisk sammensætning og krystallisationspunkt, men der er formentlig tale om ammoniumsulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

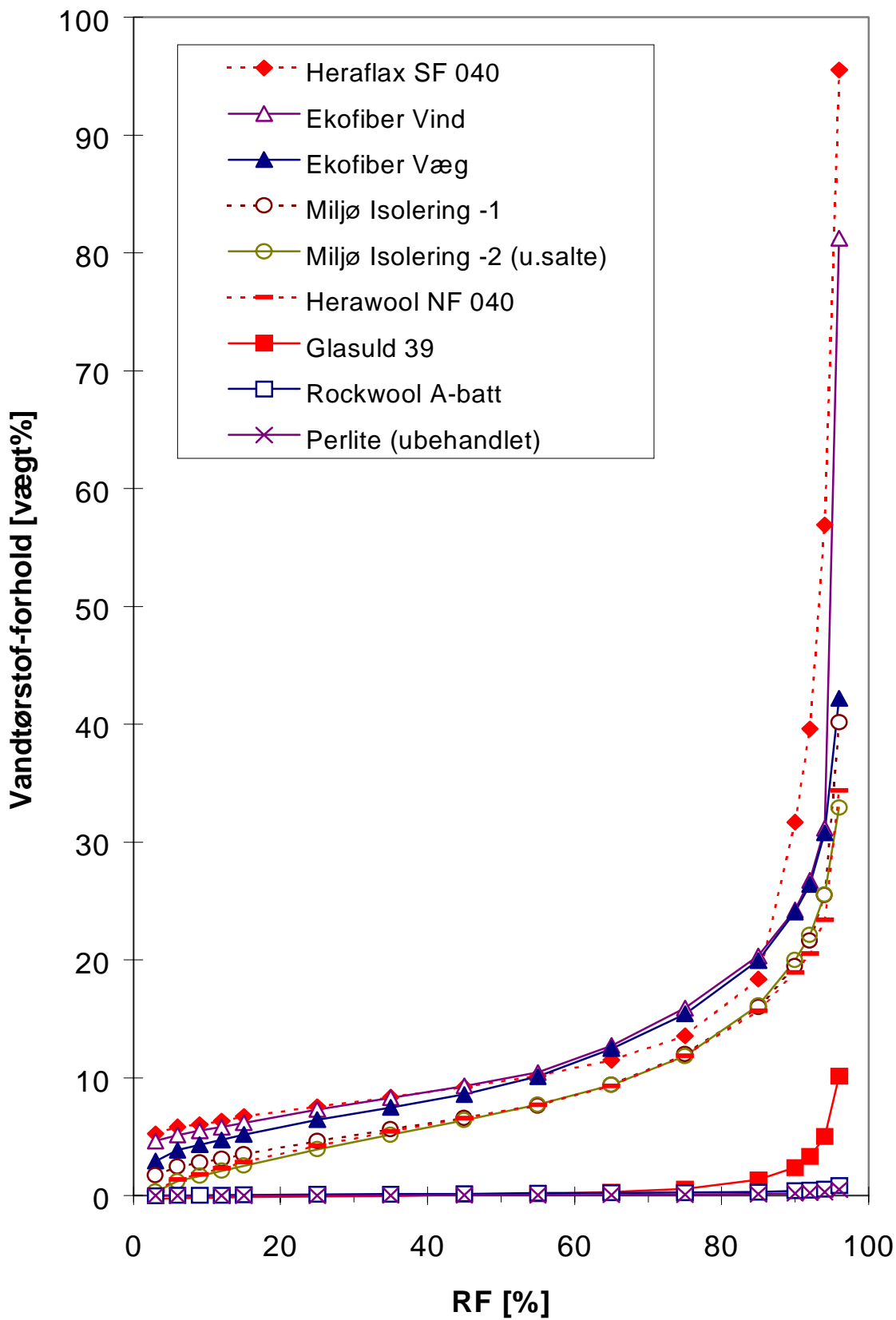
4. Måleresultater

4.1 Klimaskabsopstilling ved 20°C

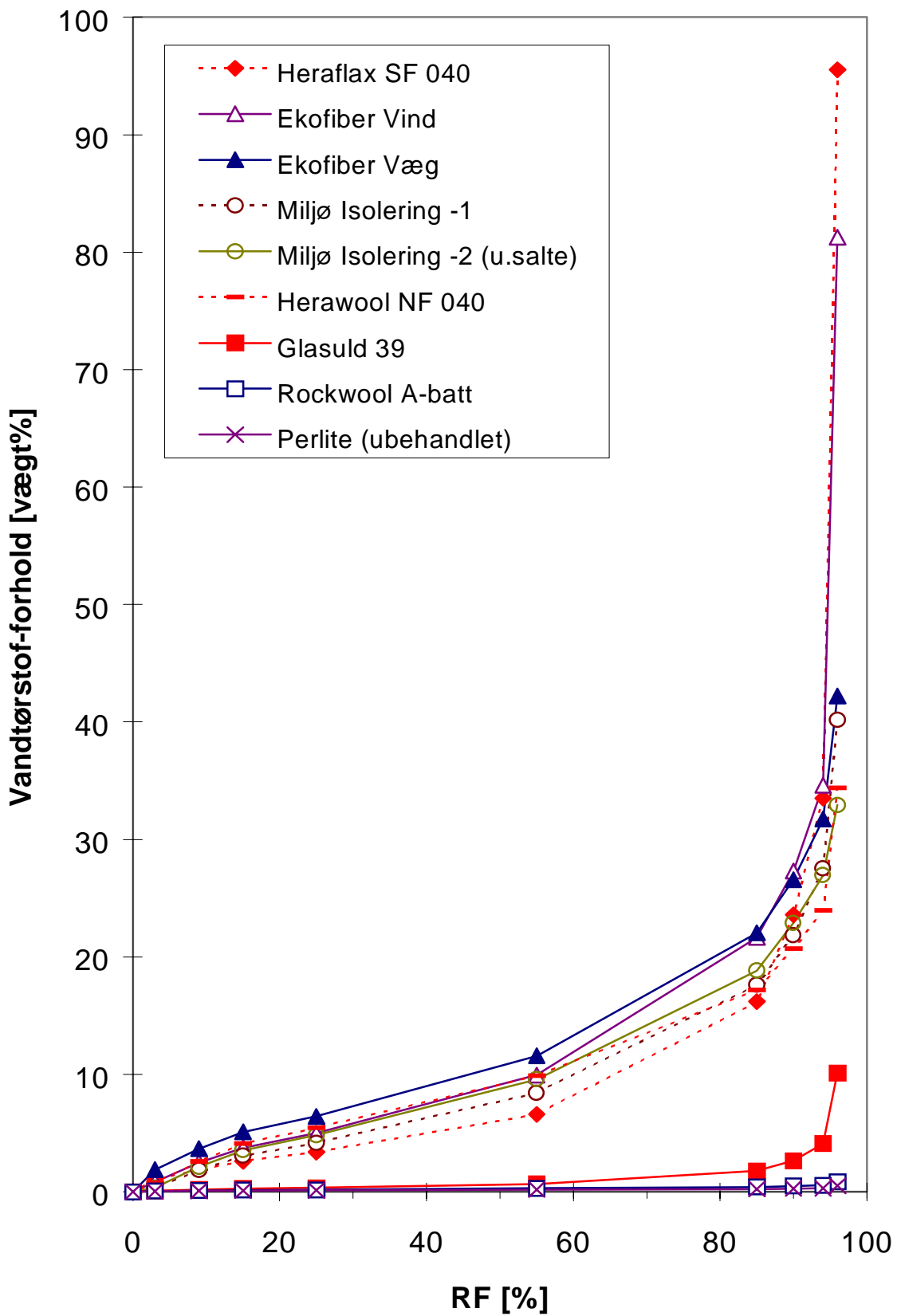
Der er udført adsorptionsmålinger på produkterne ved 3, 6, 9, 12, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 90, 92, 94 og 96% RF. I figur 4 er optegnet adsorptionsisotermer, der repræsenterer de forskellige produkttyper (mineraluld, Perlite, papirisolering, fåreuld, hør). Isotermer for de ikke nævnte produkter adskiller sig ikke væsentligt fra produkter af tilsvarende type, vist i figur 4. Som start på adsorptionsforsøget er produkterne som tidligere nævnt bragt i ligevægt ved 3% RF i klimaskabet. Tørring af produkterne er sket efter bestemmelse af desorptionsisotermer. Sorptionsisotermer og tilhørende talværdier for samtlige undersøgte produkter findes i appendix A og B.

Et færre antal punkter benyttes til optegning af desorptionsisotermerne, baseret på det detaljerede kendskab til adsorptionsisotermerne. Der er bestemt ligevægtsvandindhold ved følgende RF: 94, 90, 85, 55, 25, 15, 9 og 3% RF. Afslutningsvis tørres prøveemnerne i tre step som tidligere beskrevet (afsnit 2.2). I figur 5 er optegnet desorptionsisotermer for samme produkter som er vist i figur 4.

I appendix C er vist en kurve (figur C1) for indsvingningen ved ændring af RF fra 96% til 94% for Perlite (ubehandlet). Figuren viser den aktuelle masse [g] af det pågældende prøveemne incl. pose og ophæng som funktion af tiden [dage], regnet fra det tidspunkt hvor RF ændres. Kurven er et matematisk beregnet forløb af indsvingningen til ligevægt, jf. afsnit 2.3. Typisk har det krævet 3 dage at nå fugtlige vægt ved $\text{RF} < 85\%$ og 7-14 dage ved $\text{RF} > 85\%$, og hvor ligevægtskriteriet beskrevet i afsnit 2.3 og /3/ så vidt muligt er overholdt.



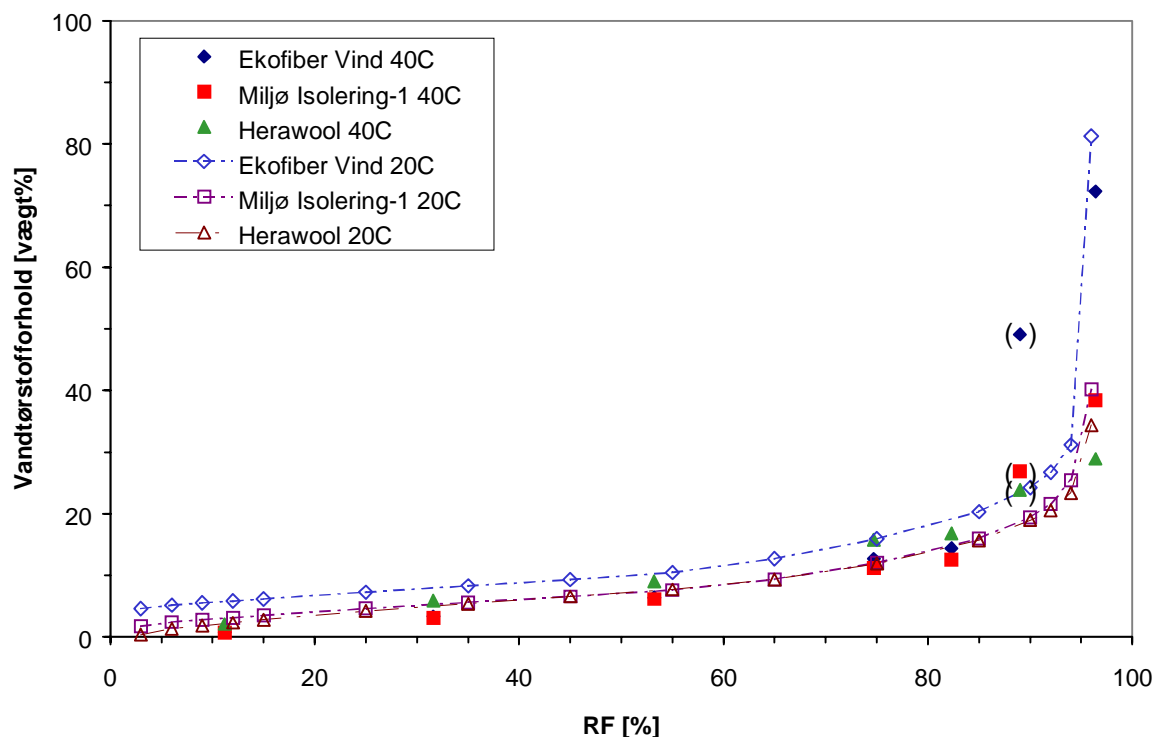
Figur 4 Adsorptionsisotermer, 20°C, klimaskabsopstilling. Udvalgte produkter. Produkterne angives efter aftagende sorptionsevne ved RF større end 90%. Reference for vandtørstofforhold er tørring over magnesiumperchlorat.



Figur 5 Desorptionsisotermer, 20°C, klimaskabsopstilling. Udvalgte produkter. Produkterne angives efter aftagende sorptionsevne ved RF større end 90%. Reference for vandtørstofforhold er tørring over magnesiumperchlorat.

4.2 Øvrige undersøgelser

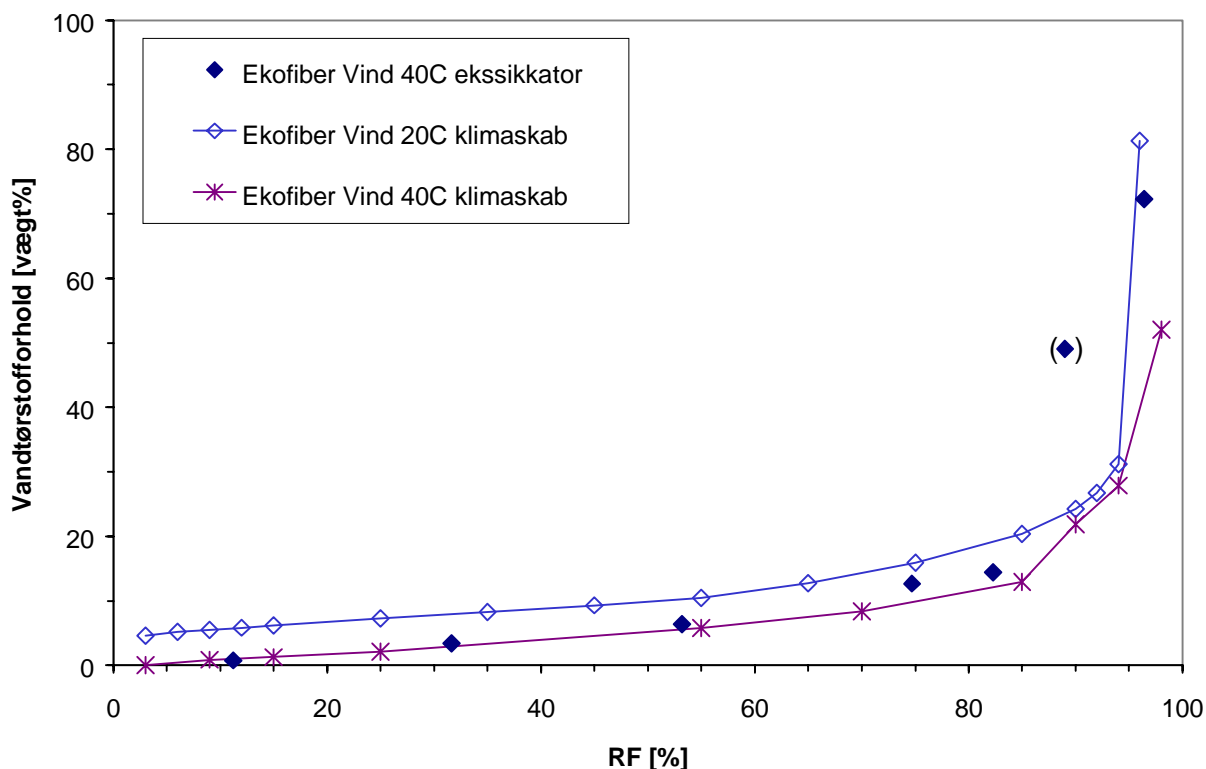
Ved 40°C er udført bestemmelser af adsorption i eksikkatoropstilling for Ekofiber Vind, Miljø Isolering -1 og Herawool ved 11% (LiCl), 32% (MgCl₂), 53% (NaBr), 75% (NaCl), 82% (KCl), 89% (KNO₃) og 96% RF (K₂SO₄)¹. I figur 6 sammenlignes resultater fra adsorption ved 40°C og 20°C for disse produkter. Talværdier for adsorption ved 40°C findes i appendix B. Tørring over magnesiumperchlorat er benyttet som reference ved eksikkatoropstilling og 3% RF ved klimaskabsopstilling.



Figur 6 Adsorptionsisotemer ved 40°C (eksikkatoropstilling) og 20°C (klimaskabsopstilling). Tørring over magnesiumperchlorat benyttes som reference ved eksikkatoropstilling og 3% RF ved klimaskabsopstilling. () angiver at måleresultatet er behæftet med fejl, da salte fra den mættede saltopløsning er udkrystalliseret på vejglasset.

Der er målt adsorptionsisoterm for Ekofiber Vind i klimaskabsopstillingen ved 40°C som en kontrol af målingen i eksikkatoropstillingen. Talværdier findes i appendix B. Fordelen ved førstnævnte er, at der ikke benyttes salte til at etablere de forskellige RF-niveauer. I figur 7 sammenlignes sorptionsisotemer for Ekofiber Vind bestemt med klimaskabsopstilling ved 20°C og 40°C samt med eksikkatoropstilling ved 40°C.

¹ Den RF som etableres over en given mættet saltopløsning er temperaturafhængig. De angivne værdier gælder ved 40°C jf. /2/.



Figur 7 Adsorptionsisotermer for Ekofiber Vind bestemt ved 20°C og 40°C (klimaskabsopstilling) samt 40°C (ekssikatoropstilling). Tørring over magnesiumperchlorat benyttes som reference for ekssikatoropstilling og 3% RF ved klimaskabsopstilling både ved 20°C og 40°C. () angiver at måleresultatet er behæftet med fejl, jf. figur 6.

Der er udført adsorptionsmålinger i ekssikatoropstilling ved 44%, 86%, 97% og 100% RF på salte fra produkterne, angivet i tabel 2. I tabel 3 er angivet ligevægtsvandindhold bestemt ved adsorption på saltene.

Tabel 3 Adsorption i vægt% målt på rene salte fra produkterne, 21°C.

Salt	44 % RF	86 % RF	97% RF	100% RF
Borsyre	0	0	0	70
Borax	0	1.3	1.7	20
Aluminiumhydroxid	0	0	0.25	0.65
Ammoniumfosfat/sulfat	0	128	198	709

Note: ammoniumfosfat/sulfat var opløst ved 86%, 97% og 100% RF.

5. Diskussion

5.1 Sorptionsisotermer ved 20°C

De undersøgte produkter ses at samle sig i to grupper; papirisolering og fåreuld samt hør optager 10-40 gange så meget vand som mineraluld og Perlite (Figur 4 og 5). For alle produkter gælder, at vandoptagelsen stiger mærkbart ved RF større end 85 à 90%.

Sorptionsisotermerne i figur 4 og 5 viser, at papirisoleringsprodukter samt produkter af fåreuld og hør opfører sig forholdsvis ens, om end specielt hør og Ekofiber Vind synes at have et meget højt ligevægtsvandindhold ved RF større end henholdsvis 85% og 94%. I /5/ rapporteres endnu højere værdier for et canadisk papirisoleringsprodukt (Isofloc), hvor vandindholdet ved 97% RF er omkring 130 vægt% baseret på tørring ved 50°C. Resultaterne for fåreuld svarer til producentens oplysninger (18 vægt% ved 80% RF), mens hør ifølge producenten skulle have et ligevægtsvandindhold på 20 vægt% ved 100% RF, hvilket er væsentlig lavere end figur 4 og 5 viser. Generelt er ligevægtsvandindholdet i produkter med cellulosefibre noget lavere end forventet, når resultaterne sammenholdes med sorptionsisotermerne for træ, jf. /10/.

Glasuld ses at optage væsentlig mere vand end Rockwool og Perlite, specielt ved RF større end 85%. I /6/ findes en lignende forskel², mens /7/ rapporterer værdier svarende til at glasuld kun optager dobbelt så meget vand fra luften som stenuld. Da /7/ er fra 1972 kan der dog være sket en del med produkterne siden da. I følge /4/ er adsorptionen for Rockwool ved 90% RF tidligere bestemt til 0.1 vægt%, hvilket skal sammenlignes med 0.4 vægt% i dette projekt. I begge tilfælde er der tale om forsvindende små mængder. Resultaterne for Perlite stemmer overens med resultater for Leca, hvor vandindholdet bestemmes til 0.4 vægt% ved 97% RF jf. /8/. Ved kontrolforsøg er det konstateret, at Perlite (behandlet) optager mere vand end Perlite (ubehandlet), så længe der er tale om vand optaget fra luften. Sammenholdt med øvrige produkter i undersøgelsen (papirisolering, fåreuld, hør) er vandoptagelsen dog fortsat forsvindende. De figurer fra /5/ - /8/, der er refereret til ovenfor, er vedlagt som appendix D.

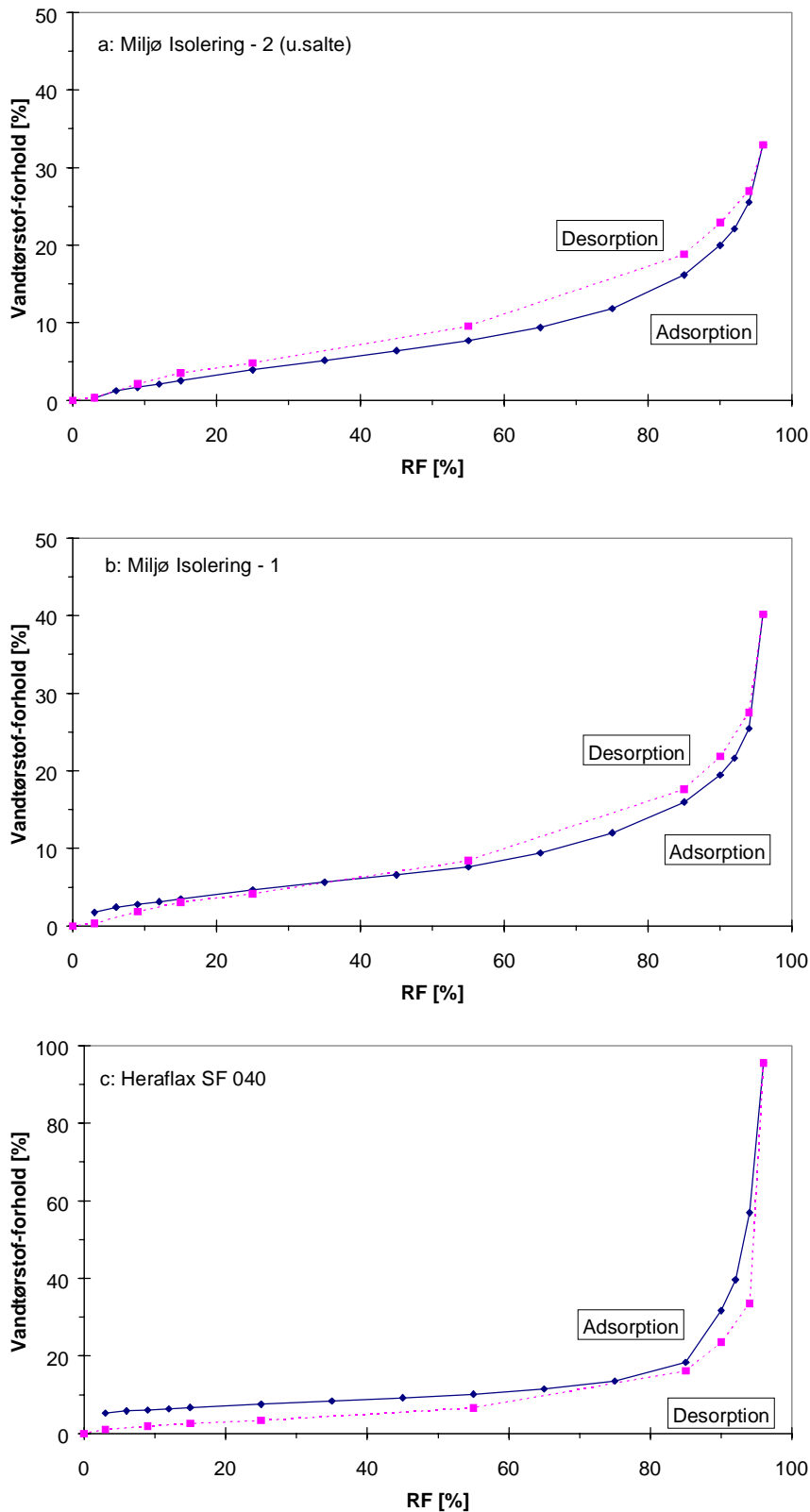
Fåreuld optager omtrent lige så meget vand som hør ved RF mindre end 70%. For RF større end 85% øges vandoptagelsen i hør voldsomt. I afsnit 5.2 diskuteres, om det store vandoptag har at gøre med det salt, der er tilsat hør (ammoniumfosfat/sulfat). Uanset at hør ligesom papirisolering (papiruld) består af cellulose, er der væsentlig større overensstemmelse mellem kurverne for fåreuld og papirisolering end mellem hør og papirisolering.

5.2 Tilsætning af salte - indvirkning på sorptionsegenskaber

Det mest interessante ved isotermerne i figur 4 og 5 er, hvordan tilsætningen af salte påvirker den forventede opførsel af produkterne. To produkter studeres nærmere i den forbindelse. Deres isotermer er vist i figur 8. Ren papirfiber uden salte (figur 8a) har den forventede isoterm for et cellulosebaseret materiale. Det samme råmateriale tilsat borsalte får et forløb som vist i figur 8b. Indledningsvis optager produktet vand indtil 96% RF. Ved denne høje RF er vandindholdet højere end for det rene materiale uden salte, hvilket indikerer at saltene fører til en øget adsorption og at saltene formentlig selv opløses og absorberes ind i fibrene. Under desorptionen forbliver kurven meget tæt på adsorptionskurven og krydser på et tidspunkt denne. Dette vurderes at skyldes en blivende ændring af tilstanden af de tilsatte borsalte, således at produktet har ændret karakter i fugtmæssig henseende.

Figur 8c viser sorptionsisotermerne for hør tilsat ammoniumfosfat/sulfat. Den udviser en mere ekstrem opførsel med desorptionskurven liggende under adsorptionskurven. Bemærk også den meget store adsorption ved RF >85%, der givetvis må skyldes det tilsatte salt.

² I /6/ findes ligevægtsvandindhold ved adsorption på 8.5 vægt% for Glasuld og 0.3 vægt% for Rockwool. Der er tale om produkter med en densitet på ca. 125 kg/m³ bestemt for tagisolering



Figur 8 Sorptionsisotermer, 20°C, klimaskabsopstilling. a: Papir fiber (Miljø Isolering -2) uden salte, b: Papir fiber (Miljø Isolering -1) med salte, c: Hør (Heraflax) med salte. Vandindhold er baseret på en vejning efter udtørring over magnesiumperchlorat.

Separate målinger på de rene salte viser at vandoptagelsen er mindre end 1.7 vægt% ved 97% RF (tabel 3), bortset fra ammoniumfosfat/sulfat, der udviser en helt ekstrem opførsel. Først ved 100% RF ses en markant vandoptagelse for borsaltene vedkommende, men fortsat forsvindende i forhold til hvad ammoniumfosfat/sulfat er i stand til at optage. Hvorvidt de opnåede værdier for dette salt er realistiske kan diskuteres, jf. den måde de undersøgte prøver er fremstillet på sammenholdt med de andre salte. Et faktum er det imidlertid, at ammoniumfosfat/sulfat optager langt mere vand end de øvrige salte. Det kan så forklare, hvorfor tør tilsat ammoniumfosfat/sulfat har så høje ligevægtsvandindhold ved RF > 85% som tilfældet er.

At de salte, der er tilsat andre af de undersøgte isoleringsprodukter, også kan influere på vandoptagelsen, uanset at saltet isoleret set ikke optager særlig meget vand, illustreres i /9/. Selv ved RF lavere end saltene krystallisationspunkt kan ses en øget vandoptagelse for et materiale af organiske fibre (silke) tilsat et uorganisk salt (natriumchlorid). Det illustreres også af, at indsvingning til ligevægt ved ændring fra 96% til 94% RF (appendix C) og modsat tager 14 dage og indsvingning til ligevægt ved 55% RF tager 3 dage, mens saltene vandoptagelse først ændres mærkbart ved RF større end 97%.

Den pågældende figur fra /9/ er vedlagt i appendix D.

5.3 Sorptionsisotermer - temperaturafhængighed

Adsorptionsisotermer bestemt ved 40°C og 20°C ligger tæt på hinanden med en tendens til, at isotermerne bestemt ved 40°C ligger lidt lavere, figur 6 og 7. Dette kan forventes, idet en højere temperatur og dermed et højere energiniveau bevirker en lettere frigørelse af vandmolekyler, jf. /10/.

Det har vist sig problematisk at måle på isoleringsprodukter ved 40°C og RF større end 90% når mættede saltopløsninger benyttes til at skabe den ønskede RF i ekssikatoropstillingen. Efter nogen tid er saltet "kravlet" op på den porcelænsplade hvorpå vejglassene står og har sat sig på lågene. For at sikre en pålidelig måling er det derfor nødvendigt med en omhyggelig aftørring af glassene inden vejning. Et andet problem kan bestå i, at der sker en reaktion mellem den mættede saltopløsning og det produkt der undersøges.

En mere detaljeret bestemmelse af isotermerne ved 40°C for RF > 90% i ekssikatoropstillingen ville være ønskeligt; kurveforløbet er noget "kantet" og ikke helt sammenligneligt med de tilsvarende kurver bestemt ved 20°C. Over en given, mættet saltopløsning skabes en bestemt RF. Denne RF har en temperaturafhængighed, som for de fleste af de benyttede salte er uden praktisk betydning. Netop for det salt, der benyttes ved ca. 90% RF, er der ifølge /2/ en væsentlig afhængighed (93% RF ved 20°C, 89% RF ved 40°C). De opnåede resultater kunne dog tyde på, at der kan stilles spørgsmålstegn ved graden af temperaturafhængighed for dette salt. Det skal understreges at der i dette projekt ikke er målt RF over de mættede saltopløsninger ved 40°C.

At sorptionsisotermerne ændres så markant ved RF > 90% hænger også sammen med at ligevægts-RF for saltene i produkterne sandsynligvis er temperaturafhængig, på samme måde som det er gældende for de mættede saltopløsninger. Dette er med til at komplicere målingerne yderligere ved høje RF og en temperatur på 40°C.

5.4 Ligevægtsvandindhold - betydning af tørremetode

Tabel 4 angiver ligevægtsvandindhold ved 85% RF bestemt ud fra tørring over magnesiumperchlorat, ved 70°C og ved 105°C for nogle af de undersøgte produkter. For samtlige produkter og RF-værdier henvises til appendix B.

Ved at sammenligne tallene i tabel 4 viser det sig, at udtørningsmetoden har en ikke uvæsentlig betydning for størrelsen af ligevægtsvandindholdet. Tørring ved 70°C ændrer primært sorptionsisotermen for Ekofiber Vind, Miljø Isolering -1 og Glasuld. Relativt set sker der også en del for Perlite, men da dette produkt optager meget lidt vand, er det ikke synligt på en sorptionsisoterm. For produkter tilsat borax skyldes forskellen efter tørring over magnesiumperchlorat henholdsvis i tørreskab bl.a. at der er stor risiko for at fjerne krystalvand eller ændre krystalformen af saltet. En forøgelse af tørretemperaturen fra 70°C til 105°C har tilsyneladende mindst lige så stor effekt på det beregnede ligevægtsvandindhold ved en given RF som hvis magnesiumperchlorat erstattes af tørring ved 70°C.

Tabel 4 Ligevægtsvandindhold [vægt%] ved 85% RF. Sammenligning af tørremetoder.

Produkt	Magnesiumperchlorat	70°C	105°C
<i>Adsorption</i>			
Perlite (behandlet)	0.31	0.97	1.32
Ekofiber Vind	20.4	23.8	27.7
Miljø Isolering -1	16.0	18.2	20.7
Herawool	15.7	16.7	18.3
Glasuld	1.35	2.42	3.02
<i>Desorption</i>			
Perlite (behandlet)	0.40	1.06	1.41
Ekofiber Vind	21.7	25.1	29.1
Miljø Isolering -1	17.6	19.9	22.4
Herawool	17.2	18.2	19.9
Glasuld	1.79	2.87	3.47

6. Konklusion

Målingen af sorptionsisoterner viser, at produkter med organiske fibre optager langt mere vand end traditionelle mineraluldsprodukter. Perlite og stenuld indeholder mindre end 2 vægt% vand ved 96% RF. Glasuld er lidt mere hygroskopisk og indeholder ca. 10 vægt% vand ved 96% RF. Den større vandoptagelse sker primært ved RF større end 75%. Papirisolering og fåreuld samt hør er meget hygroskopiske og kan indeholde 40-90 vægt% vand ved 96% RF. Den indbyrdes forskel mellem disse produkter gør sig først gældende ved RF større end 85%. Ved lavere RF er forskellen højst 3-4 vægt%. Ved meget høje RF sker der for produkter med salte en irreversibel ændring af produktets tilstand, der bevirker at desorptionsisotermen på sin vej mod 0% RF krydser adsorptionsisotermen eller ligger under denne, mens den for produkter uden salte ligger over adsorptionsisotermen. Det er derfor vigtigt at starte så tæt på 0% RF før bestemmelsen af adsorptionsisotermen sættes igang. Samtidig konstateres, at graden af udtørring spiller en ikke uvæsentlig rolle for størrelsen af ligevægtsvandindholdet og at det

derfor er vigtigt at gøre sig klart, hvilken situation der skal benyttes som referencetilstand, og at denne angives.

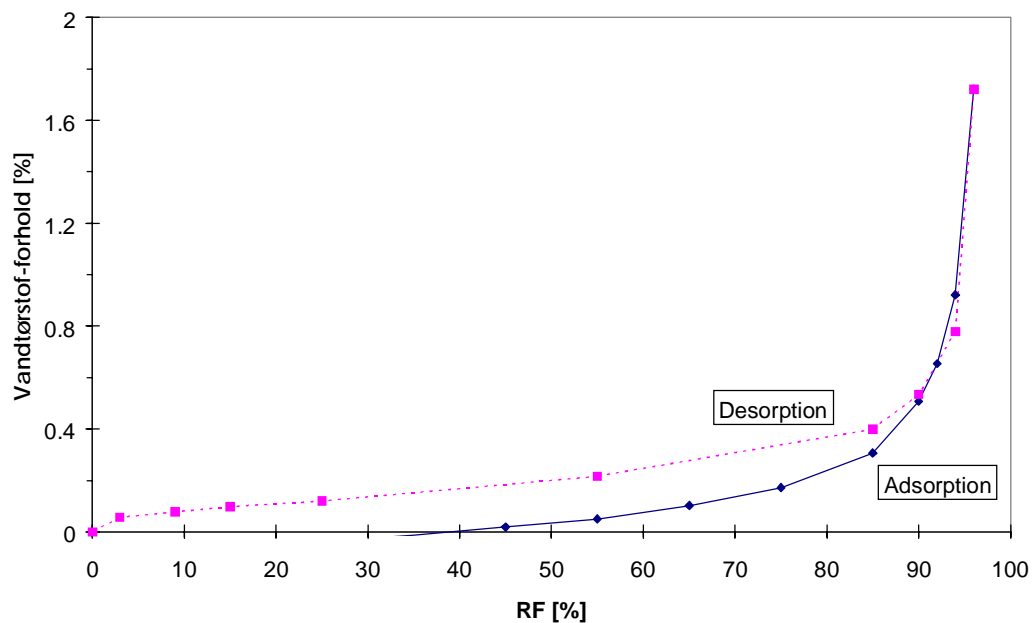
7. Litteratur

- /1/ Strømdahl K. (2000): Ph.D.-afhandling under udarbejdelse. BKM, DTU.
- /2/ prEN ISO 12571 (1999): *Hygrothermal performance of building materials - Determination of hygroscopic sorption properties*. CEN/TC89/WG10. European Committee for Standardization.
- /3/ Strømdahl K.; Hansen, K.K. og Nielsen, L.F. (1996): *Vejledning til Windows-programmet SorpVej til sorptionsmåling*. Serie I No.11, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM), DTU.
- /4/ Hansen, E.J. de Place (1999): *Produktionsprocesser og egenskaber for isoleringsmaterialer*. Projekt: "Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer", Serie R No.57, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM), DTU.
- /5/ Isaksen K. (1993): *Verificering af MATCH-programmet ved hjælp af målinger i gammastrålingsudstyr. Hovedrapport*. Eksamensprojekt, Lab. for Bygningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole.
- /6/ Pedersen, C.R. (1991): *Sorptionskurver for udvalgte prøver af Glasuld og Rockwool*. Rapport 91-16, Lab. for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby.
- /7/ Ahlgren L. (1972): *Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial*. Rapport 36, Byggnadsteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.
- /8/ Hansen, K.K. (1994): *Måling af letklinkers sorptionsisotermer*. Teknisk Rapport 322, Lab. for Bygningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole.
- /9/ Padfield, T. and Erhardt D. (1987): *The Spontaneous Transfer to Glass of an Image of Joan of Arc*. Preprints of the Sydney Conference of the International Council of Museums (ICOM), Conservation Committee, September 1987. Vol.3, pp.909-914.
- /10/ Gottfredsen, F.R. og Nielsen A. (1997): *Bygningsmaterialer. Grundlæggende egenskaber*. Polyteknisk Forlag.

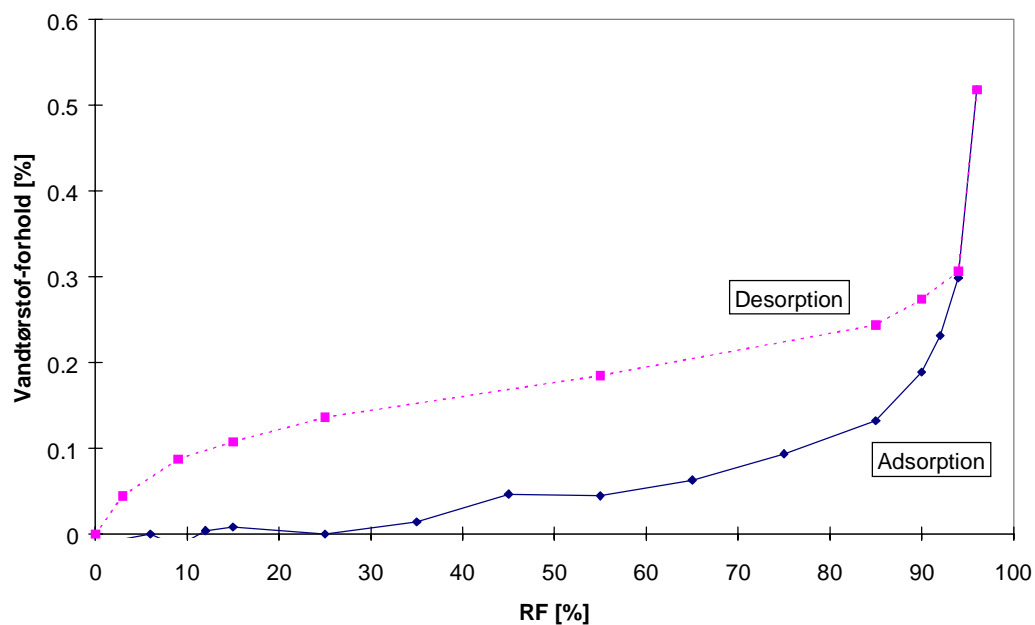
Appendix A - Sorptionsisoterner for hver enkelt materiale

Reference for vandtørstofforhold: tørring over magnesiumperchlorat.

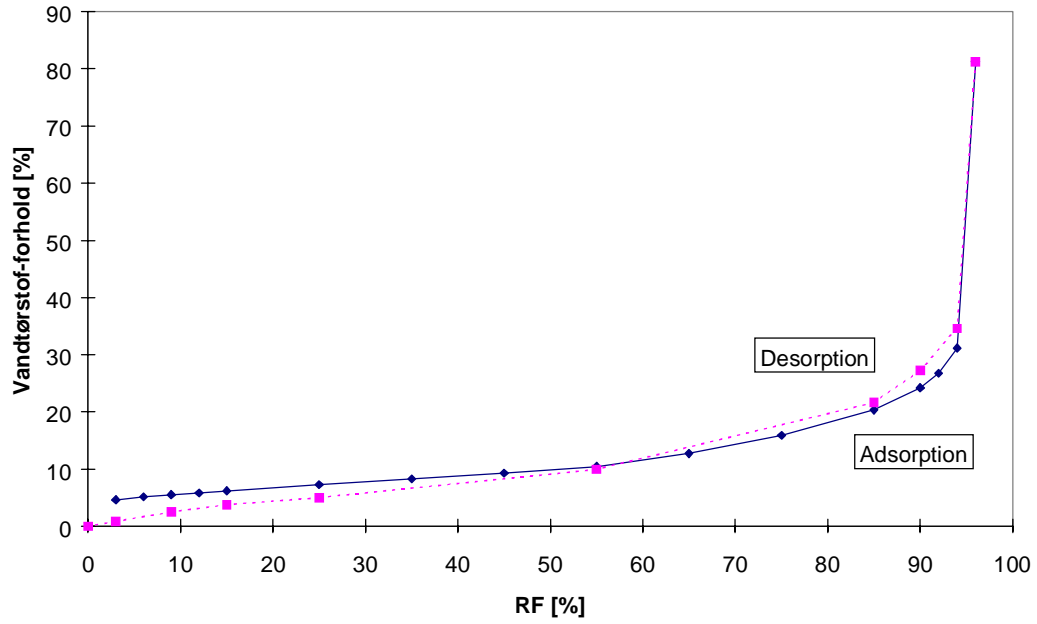
Perlite SC (behandlet) - tørring over magnesiumperchlorat



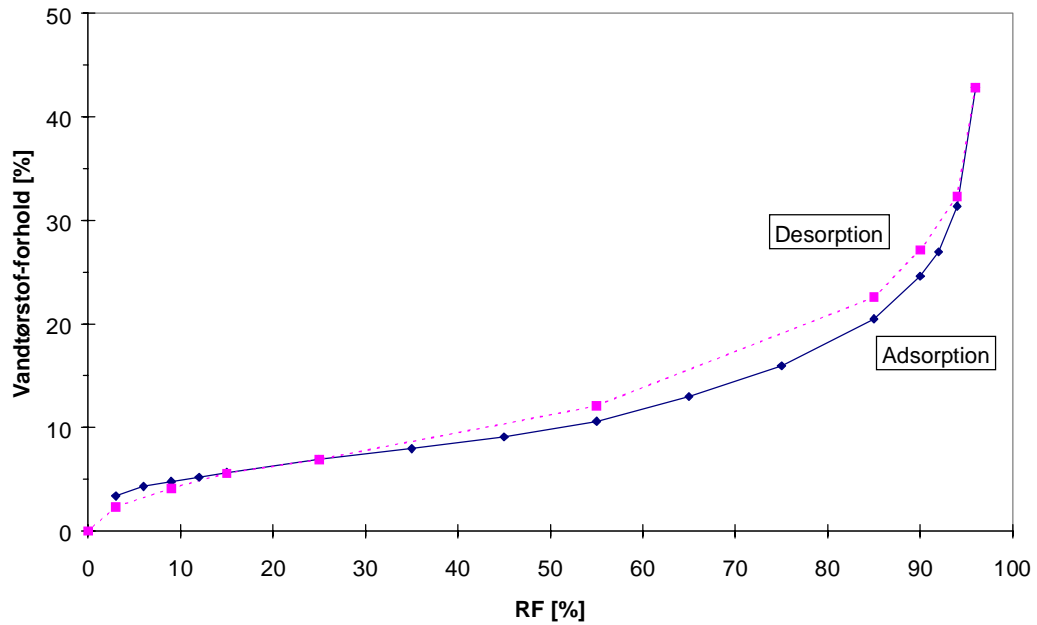
Perlite (ubehandlet) - tørring over magnesiumperchlorat



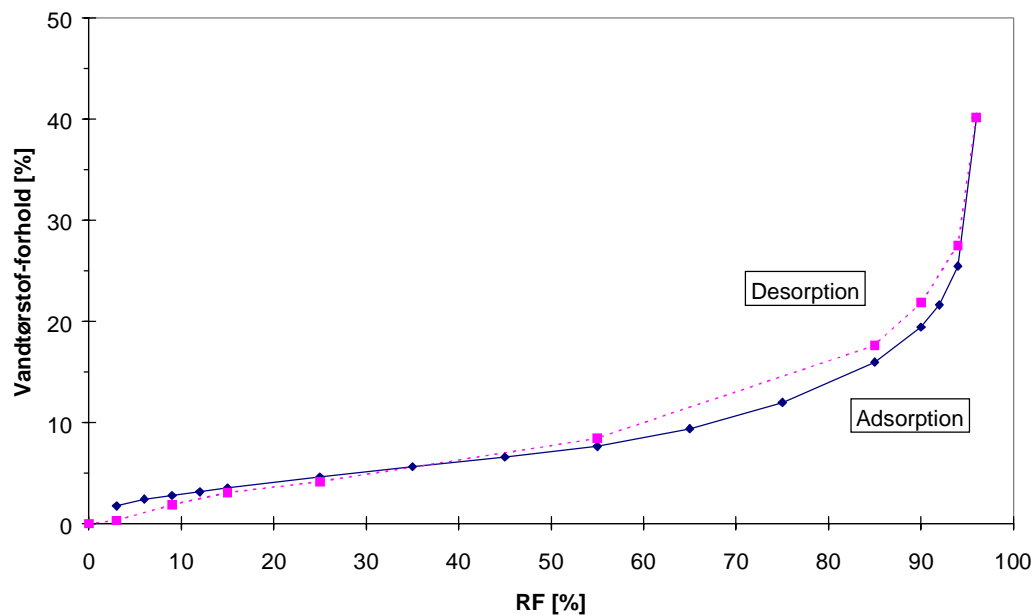
Ekofiber Vind - tørring over magnesiumperchlorat



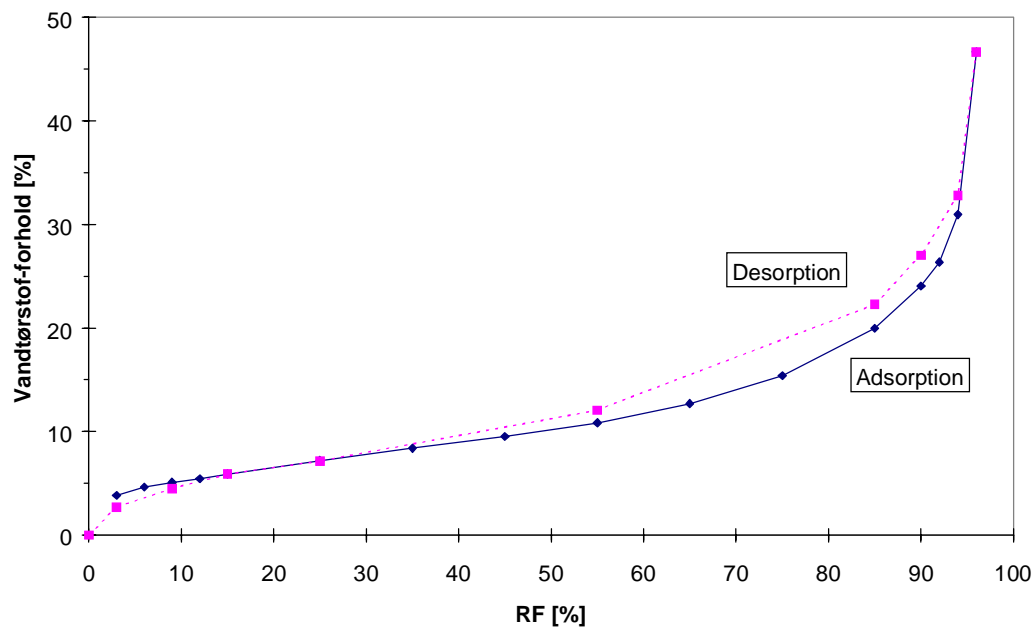
Ekofiber Væg - tørring over magnesiumperchlorat



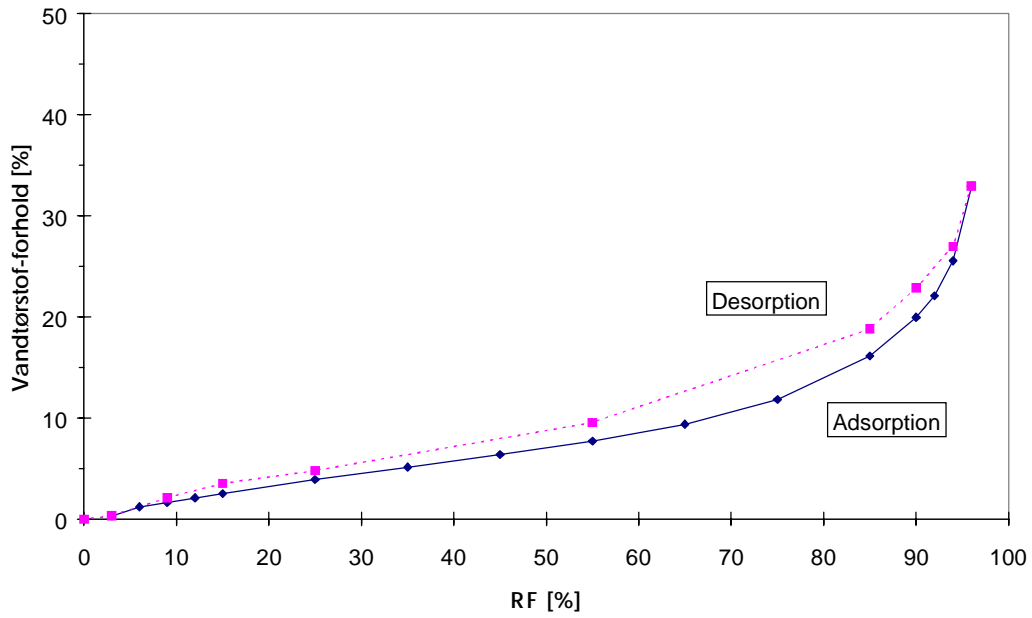
Miljø Isolering - 1, tørring over magnesiumperchlorat



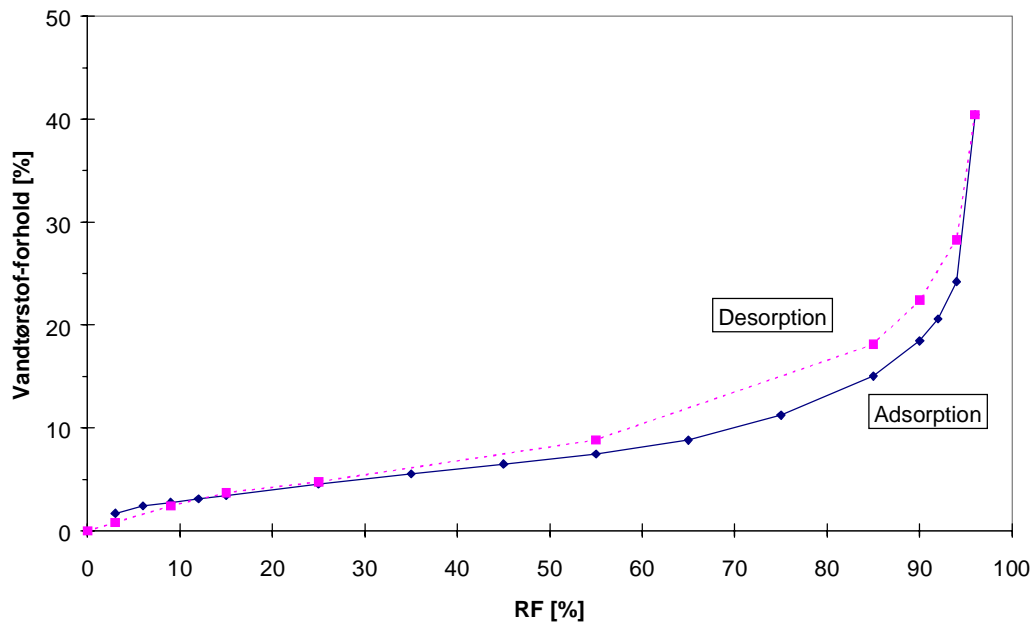
Miljø Isolering (SBI) - tørring over magnesiumperchlorat



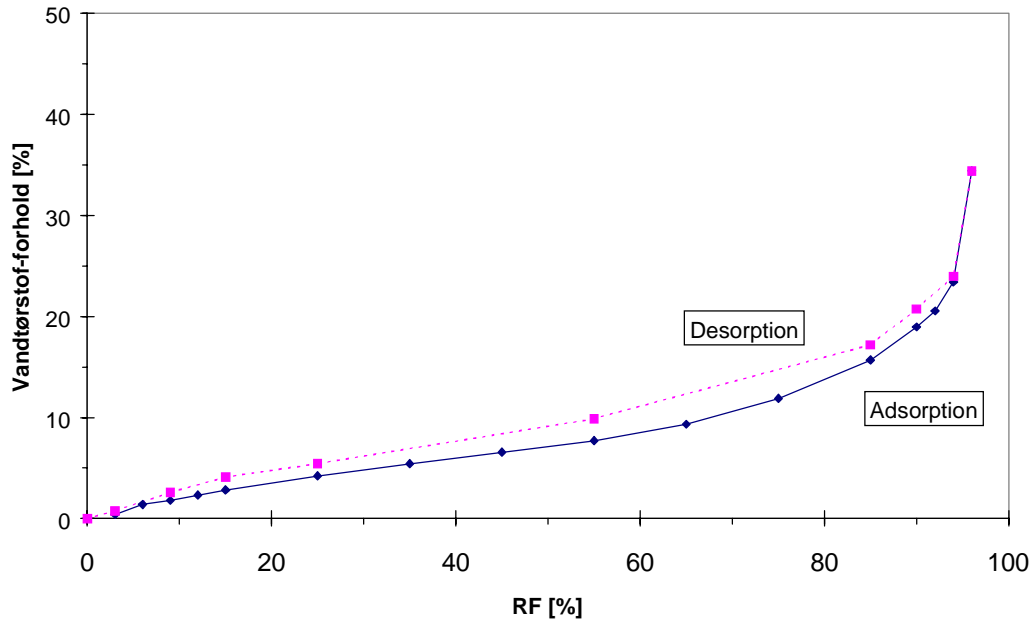
Miljø Isolering - 2 (u.salte), tørring over magnesiumperchlorat



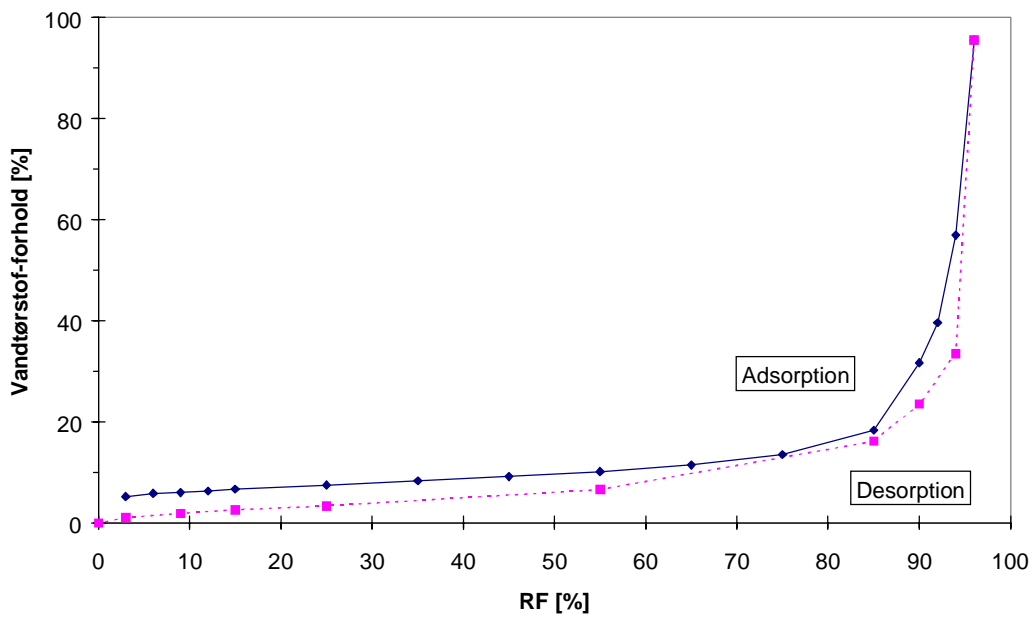
Isodan - tørring over magnesiumperchlorat



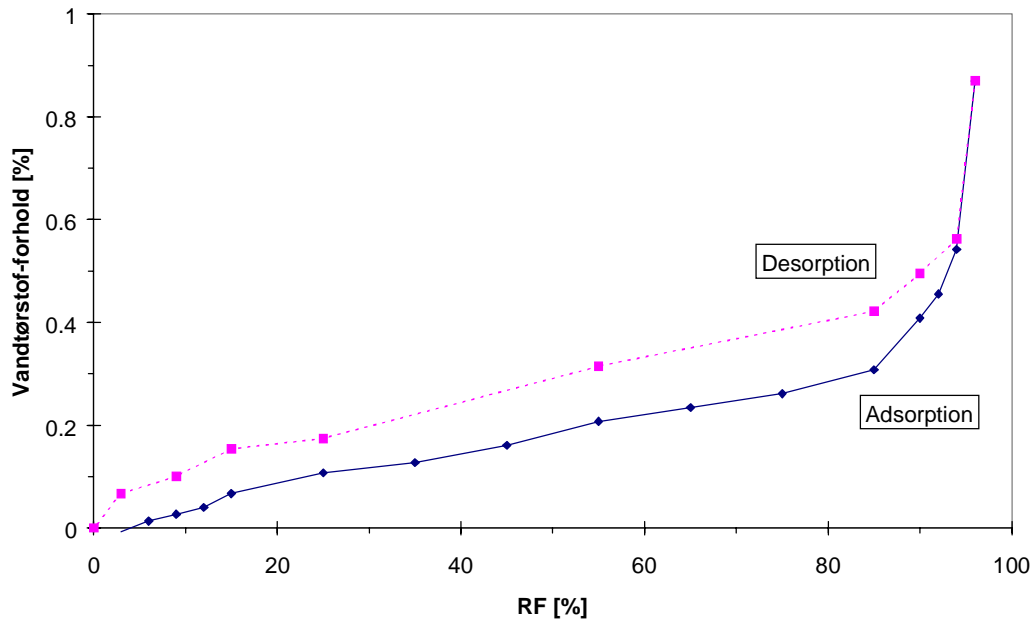
Herawool NF 040 (med støttestreber) - tørring over magnesiumperchlorat



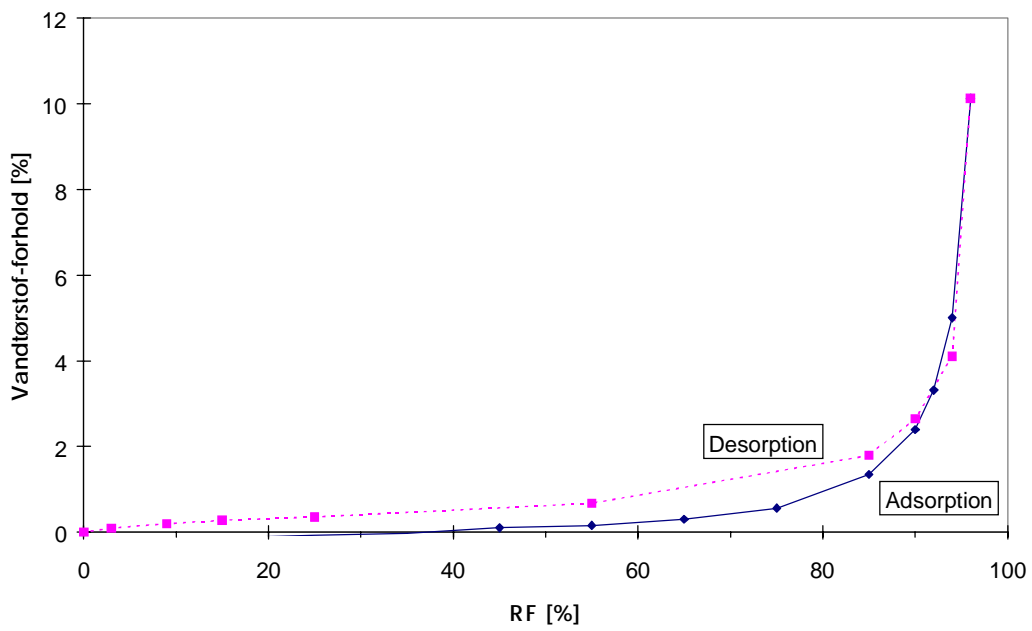
Heraflax SF 040 - tørring over magnesiumperchlorat



Rockwool A-batt - tørring over magnesiumperchlorat



Glasuld 39 - tørring over magnesiumperchlorat



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

Adsorption		Klimaskab ved 20°C										Reference: tørring over magnesiumperchlorat									
% RF	Rockwool A-batt	Glasuld 39	Perlite SC (behandlet)	Perlite (ubehandlet)	Ekofiber Vind	Miljø Isolering -1		Isodan	SBI Herawool NF 040, m. støttefibre		SBI Heraflex SF 040		Miljø Isolering -SBI		Ekofiber Væg						
						Miljø Isolering	Miljø Isolering -2, u.salte		Herawool	SBI	Heraflex	Miljø Isolering	SBI								
3	-0.007	-0.28	-0.055	-0.006	4.64	1.74	0.33	1.70	0.41	5.24	2.79	2.92									
6	0.013	-0.22	-0.061	0.000	5.15	2.44	1.22	2.44	1.39	5.84	3.60	3.86									
9	0.027	-0.22	-0.057	-0.014	5.52	2.80	1.68	2.77	1.81	6.04	4.03	4.31									
12	0.040	-0.17	-0.053	0.004	5.82	3.13	2.10	3.10	2.31	6.34	4.38	4.73									
15	0.067	-0.13	-0.063	0.008	6.17	3.51	2.54	3.43	2.84	6.72	4.83	5.19									
25	0.11	-0.07	-0.038	0.000	7.30	4.63	3.92	4.53	4.22	7.54	6.11	6.45									
35	0.13	-0.02	-0.013	0.014	8.31	5.65	5.16	5.53	5.44	8.36	7.30	7.48									
45	0.16	0.10	0.019	0.047	9.30	6.58	6.39	6.50	6.57	9.21	8.42	8.60									
55	0.21	0.16	0.051	0.045	10.5	7.63	7.71	7.48	7.71	10.2	9.73	10.1									
65	0.23	0.30	0.10	0.063	12.7	9.40	9.39	8.81	9.33	11.5	11.6	12.5									
75	0.26	0.56	0.17	0.093	15.9	12.0	11.8	11.2	11.9	13.5	14.2	15.4									
85	0.31	1.35	0.31	0.13	20.4	16.0	16.1	15.0	15.7	18.4	18.8	20.0									
90	0.41	2.39	0.51	0.19	24.3	19.4	20.0	18.5	19.0	31.7	22.8	24.1									
92	0.46	3.31	0.65	0.23	26.8	21.6	22.1	20.6	20.5	39.6	25.1	26.4									
94	0.54	5.00	0.92	0.30	31.2	25.5	25.6	24.2	23.4	56.9	29.6	30.8									
96	0.87	10.1	1.72	0.52	81.3	40.2	32.9	40.4	34.4	95.5	45.2	42.2									

SBI:

prøvenner stammer fra materiale skaffet hos SBI (Statens Byggeforskningsinstitut), da Heraflax og Herawool ikke var leveret til DTU på det tidspunkt målingerne blev sat i gang. Desuden undersøges en prøve af SBI's leverance fra Miljø Isolering, mærket Miljø Isolering - SBI.

Adsorption		Vandkar ved 40°C - do. reference	
% RF	Ekofiber Vind	Miljø Isolering-1	Herawool
11	0.79	0.71	2.14
32	3.36	3.07	5.74
53	6.40	6.17	9.00
75	12.7	11.2	15.8
82	14.4	12.6	16.8
89	49.1	26.9	23.9
96	72.3	38.4	28.9

Adsorption		Klimaskab ved 40°C - do. reference	
% RF	Ekofiber Vind		
3	0.00		
9	0.89		
15	1.29		
25	2.09		
55	5.80		
70	8.37		
85	13.0		
90	21.8		
94	27.9		
98	52.0		

Adsorption		Klimaskab ved 20°C										Reference: tørring ved 70°C			
% RF	Rockwool A-batt	Glasuld 39	Perlite SC (behandlet)	Perlite (ubehandlet)	Ekofiber Vind	Ekofiber	Miljø Isolering -1	Miljø Isolering -2, u.salte	Isodan	SBI			Ekofiber Væg		
										Herawool NF 040, m. støttestof	Heraflex SF 040	Miljø Isolering -SBI			
3	0.10	0.77	0.61	0.67	7.62	3.71	1.42	3.00	1.30	5.20	3.84	3.39			
6	0.12	0.84	0.60	0.68	8.15	4.42	2.32	3.74	2.29	5.80	4.66	4.32			
9	0.13	0.84	0.60	0.66	8.53	4.78	2.78	4.07	2.72	5.99	5.09	4.78			
12	0.15	0.89	0.61	0.68	8.84	5.12	3.21	4.40	3.22	6.29	5.45	5.20			
15	0.17	0.92	0.60	0.69	9.20	5.50	3.64	4.75	3.75	6.67	5.90	5.66			
25	0.21	0.98	0.62	0.68	10.4	6.64	5.04	5.86	5.14	7.49	7.20	6.93			
35	0.23	1.04	0.65	0.69	11.4	7.68	6.29	6.87	6.38	8.31	8.39	7.96			
45	0.27	1.16	0.68	0.73	12.4	8.64	7.54	7.85	7.52	9.17	9.53	9.09			
55	0.31	1.21	0.71	0.72	13.6	9.71	8.88	8.84	8.67	10.1	10.8	10.6			
65	0.34	1.36	0.76	0.74	15.9	11.5	10.6	10.2	10.3	11.4	12.7	13.0			
75	0.37	1.62	0.83	0.77	19.2	14.2	13.0	12.7	12.9	13.5	15.4	15.9			
85	0.42	2.42	0.97	0.81	23.8	18.2	17.4	16.5	16.7	18.3	20.0	20.5			
90	0.52	3.47	1.17	0.87	27.8	21.8	21.3	20.0	20.0	31.6	24.0	24.6			
92	0.56	4.40	1.32	0.91	30.4	24.0	23.4	22.1	21.6	39.6	26.4	27.0			
94	0.65	6.11	1.59	0.98	34.9	27.9	26.9	25.8	24.5	56.9	31.0	31.4			
96	0.98	11.3	2.39	1.20	86.4	42.9	34.4	42.2	35.6	95.4	46.7	42.8			

SBI: prøvemner stammer fra materiale skaffet hos SBI (Statens Byggeforskningsinstitut), da Heraflax og Herawool ikke var leveret til DTU på det tidspunkt målingerne blev sat i gang. Desuden undersøges en prøve af SBI's leverance fra Miljø Isolering, mærket Miljø Isolering - SBI.

Adsorption

Klimaskab ved 20°C

Reference: tørring ved 105°C

% RF A-batt	Rockwool		Perlite SC (behandlet)		Perlite (ubehandlet)		Ekofiber Vind		Miljø Isolering -1		Miljø Isolering -2, u.salte		Isodan		SBI Herawool NF 040, m. støttefibre		SBI Herflax SF 040		SBI Miljø Isolering -SBI		Ekofiber Væg		
	39	39	SC	SC	Perlite	Perlite	Ekofiber	Ekofiber	Miljø	Miljø	Miljø	Miljø	Isodan	Herawool	Herawool	Herflax	Herflax	Miljø	Miljø	Miljø	Miljø	Ekofiber	Ekofiber
3	0.30	1.37	0.95	0.95	1.30	1.30	11.0	11.0	5.87	5.87	2.84	2.84	5.16	2.69	2.69	8.20	8.20	5.66	5.66	5.66	5.66	5.27	5.27
6	0.32	1.43	0.95	0.95	1.30	1.30	11.5	11.5	6.60	6.60	3.75	3.75	5.92	3.70	3.70	8.82	8.82	6.49	6.49	6.49	6.49	6.22	6.22
9	0.33	1.43	0.95	0.95	1.29	1.29	11.9	11.9	6.97	6.97	4.22	4.22	6.26	4.13	4.13	9.02	9.02	6.93	6.93	6.93	6.93	6.68	6.68
12	0.34	1.48	0.95	0.95	1.31	1.31	12.3	12.3	7.32	7.32	4.66	4.66	6.60	4.64	4.64	9.33	9.33	7.29	7.29	7.29	7.29	7.11	7.11
15	0.37	1.52	0.94	0.94	1.31	1.31	12.6	12.6	7.71	7.71	5.10	5.10	6.95	5.17	5.17	9.72	9.72	7.75	7.75	7.75	7.75	7.58	7.58
25	0.41	1.58	0.97	0.97	1.30	1.30	13.8	13.8	8.87	8.87	6.52	6.52	8.08	6.59	6.59	10.6	10.6	9.08	9.08	9.08	9.08	8.87	8.87
35	0.43	1.63	0.99	0.99	1.32	1.32	14.9	14.9	9.94	9.94	7.79	7.79	9.12	7.84	7.84	11.4	11.4	10.3	10.3	10.3	10.3	9.92	9.92
45	0.46	1.76	1.03	1.03	1.35	1.35	15.9	15.9	10.9	10.9	9.1	9.1	10.1	8.99	8.99	12.3	12.3	11.4	11.4	11.4	11.4	11.1	11.1
55	0.51	1.81	1.06	1.06	1.35	1.35	17.2	17.2	12.0	12.0	10.4	10.4	11.1	10.2	10.2	13.3	13.3	12.8	12.8	12.8	12.8	12.6	12.6
65	0.54	1.96	1.11	1.11	1.37	1.37	19.6	19.6	13.8	13.8	12.1	12.1	12.5	11.8	11.8	14.6	14.6	14.7	14.7	14.7	14.7	15.0	15.0
75	0.56	2.22	1.18	1.18	1.40	1.40	23.0	23.0	16.5	16.5	14.6	14.6	15.0	14.4	14.4	16.7	16.7	17.4	17.4	17.4	17.4	18.1	18.1
85	0.61	3.02	1.32	1.32	1.44	1.44	27.7	27.7	20.7	20.7	19.0	19.0	19.0	18.3	18.3	21.7	21.7	22.1	22.1	22.1	22.1	22.7	22.7
90	0.71	4.08	1.52	1.52	1.49	1.49	31.8	31.8	24.3	24.3	23.0	23.0	22.5	21.7	21.7	35.4	35.4	26.2	26.2	26.2	26.2	26.9	26.9
92	0.76	5.02	1.67	1.67	1.54	1.54	34.5	34.5	26.6	26.6	25.2	25.2	24.7	23.3	23.3	43.5	43.5	28.6	28.6	28.6	28.6	29.3	29.3
94	0.85	6.74	1.94	1.94	1.60	1.60	39.1	39.1	30.6	30.6	28.7	28.7	28.4	26.2	26.2	61.3	61.3	33.3	33.3	33.3	33.3	33.8	33.8
96	1.17	11.9	2.75	2.75	1.83	1.83	92.3	92.3	45.8	45.8	36.3	36.3	45.2	37.4	37.4	101.0	101.0	49.2	49.2	49.2	49.2	45.4	45.4

SBI:

prøvemner stammer fra materiale skaffet hos SBI (Statens Byggeforskningsinstitut), da Heraflax og Herawool ikke var leveret til DTU på det tidspunkt målingerne blev sat i gang. Desuden undersøges en prøve af SBI's leverance fra Miljø Isolering, mærket Miljø Isolering - SBI.

Desorption Klimaskab ved 20°C

Reference: tørring over magnesiumperchlorat

% RF	Rockwool A-batt	Glasuld 39	Perlite SC (behandlet)	Perlite (ubehandlet)	Ekofiber Vind	Mijlø Isolering -1	Mijlø Isolering -2, u.salte	Isodan	SBI		Ekofiber Væg	
									Herawool NF 040, m. støttestof fibre	Heraflex SF 040		
96	0.87	10.1	1.72	0.52	81.3	40.2	32.9	40.4	34.4	95.5	45.2	42.2
94	0.56	4.10	0.78	0.31	34.6	27.5	27.0	28.3	24.0	33.5	31.5	31.7
90	0.50	2.65	0.53	0.27	27.3	21.9	22.9	22.4	20.7	23.6	25.7	26.6
85	0.42	1.79	0.40	0.24	21.7	17.6	18.8	18.1	17.2	16.2	21.1	22.0
55	0.31	0.67	0.22	0.18	9.94	8.43	9.57	8.84	9.88	6.61	10.9	11.6
25	0.17	0.35	0.12	0.14	5.00	4.17	4.82	4.76	5.44	3.38	6.06	6.43
15	0.15	0.28	0.10	0.11	3.76	3.05	3.53	3.70	4.11	2.61	4.82	5.11
9	0.10	0.20	0.078	0.087	2.50	1.86	2.14	2.44	2.58	1.89	3.45	3.67
3	0.067	0.093	0.057	0.045	0.84	0.33	0.34	0.80	0.76	1.07	1.66	1.88
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Desorption Klimaskab ved 20°C

Reference: tørring ved 70° C

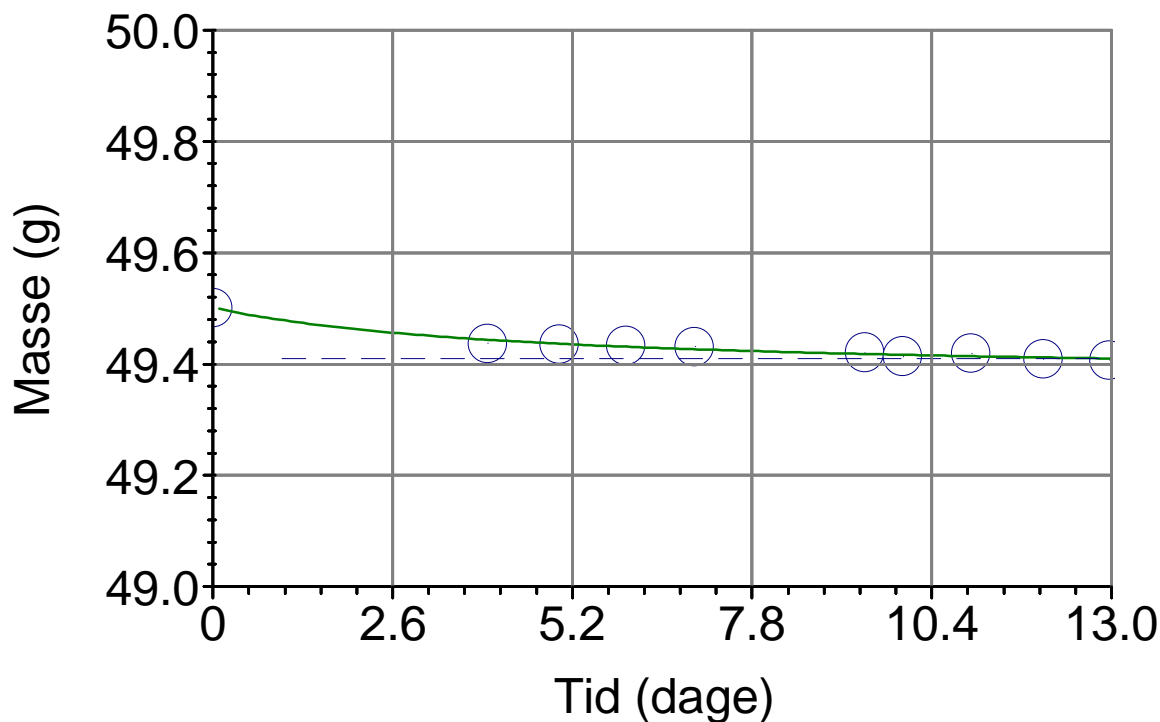
% RF	Rockwool A-batt	Glasuld 39	Perlite SC (behandlet)	Perlite (ubehandlet)	Ekofiber Vind	Mijlø Isolering -1	Mijlø Isolering -2, u.salte	Isodan	SBI		Ekofiber Væg	
									Herawool NF 040, m. støttestof fibre	Heraflex SF 040		
96	0.98	11.3	2.39	1.20	86.4	42.9	34.4	42.2	35.6	95.4	46.7	42.8
94	0.67	5.20	1.44	0.99	38.4	30.0	28.3	29.9	25.1	33.5	32.8	32.3
90	0.60	3.74	1.20	0.96	30.9	24.2	24.2	24.0	21.8	23.5	27.0	27.1
85	0.53	2.87	1.06	0.92	25.1	19.9	20.1	19.6	18.2	16.1	22.3	22.6
55	0.42	1.74	0.88	0.87	13.1	10.5	10.8	10.2	10.9	6.56	12.1	12.1
25	0.28	1.41	0.78	0.82	8.00	6.18	5.95	6.09	6.38	3.33	7.15	6.91
15	0.26	1.34	0.76	0.79	6.72	5.04	4.65	5.01	5.04	2.57	5.89	5.58
9	0.21	1.26	0.74	0.77	5.43	3.82	3.24	3.74	3.49	1.84	4.51	4.14
3	0.17	1.15	0.72	0.72	3.72	2.27	1.42	2.08	1.66	1.02	2.70	2.34
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

SBI: se næste side

Desorption		Klimaskab ved 20°C										Reference: tørring ved 105° C									
% RF	Rockwool A-batt	Glasuld 39	Perlite SC (behandlet)	Perlite (ubehandlet)	Ekofiber Vind	Ekofiber Isolering -1	Miljø Isolering -2, u.salte	Isodan	SBI			Herawool NF 040, m. støttestofibre	Heraflex SF 040	Miljø Isolering -SBI	Ekofiber Væg						
									SBI	SBI	SBI										
96	1.17	11.9	2.75	1.83	92.3	45.8	36.3	45.2	37.4	101.0	49.2	45.4									
94	0.87	5.82	1.79	1.61	42.8	32.7	30.1	32.6	26.8	37.3	35.1	34.7									
90	0.80	4.35	1.55	1.58	35.0	26.8	26.0	26.6	23.5	27.1	29.3	29.5									
85	0.72	3.47	1.41	1.55	29.1	22.4	21.8	22.1	19.9	19.5	24.4	24.8									
55	0.62	2.34	1.23	1.49	16.6	12.8	12.3	12.5	12.4	9.61	14.0	14.1									
25	0.48	2.01	1.13	1.44	11.4	8.40	7.44	8.32	7.84	6.29	9.02	8.86									
15	0.46	1.94	1.11	1.41	10.1	7.24	6.12	7.22	6.48	5.50	7.75	7.50									
9	0.40	1.85	1.09	1.39	8.73	5.99	4.69	5.92	4.91	4.75	6.34	6.03									
3	0.37	1.75	1.07	1.35	6.97	4.40	2.85	4.22	3.05	3.91	4.50	4.20									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									

SBI: prøvemner stammer fra materiale skaffet hos SBI (Statens Byggeforskningsinstitut), da Heraflax og Herawool ikke var leveret til DTU på det tidspunkt målingerne blev sat i gang. Desuden undersøges en prøve af SBI's leverance fra Miljø Isolering, mærket Miljø Isolering - SBI.

Appendix C - Indsvingning til ligevægt - eksempel



Figur C1 Perlite (ubehandlet). Indsvingning fra 96% til 94% RF.

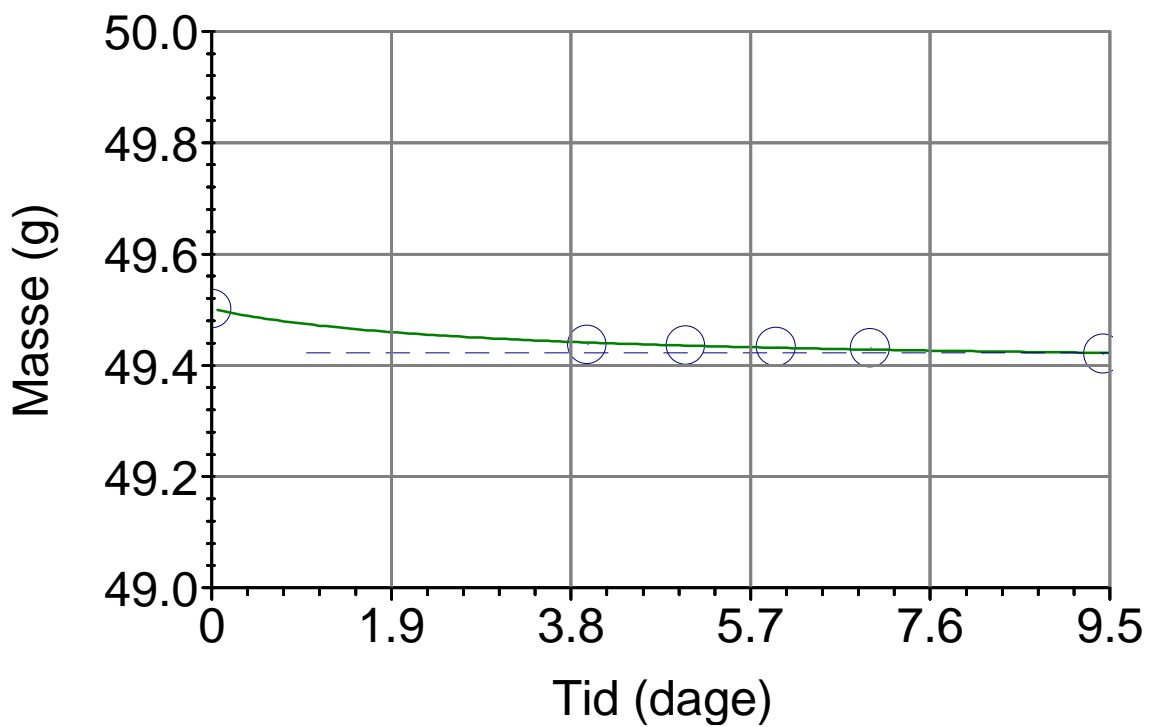
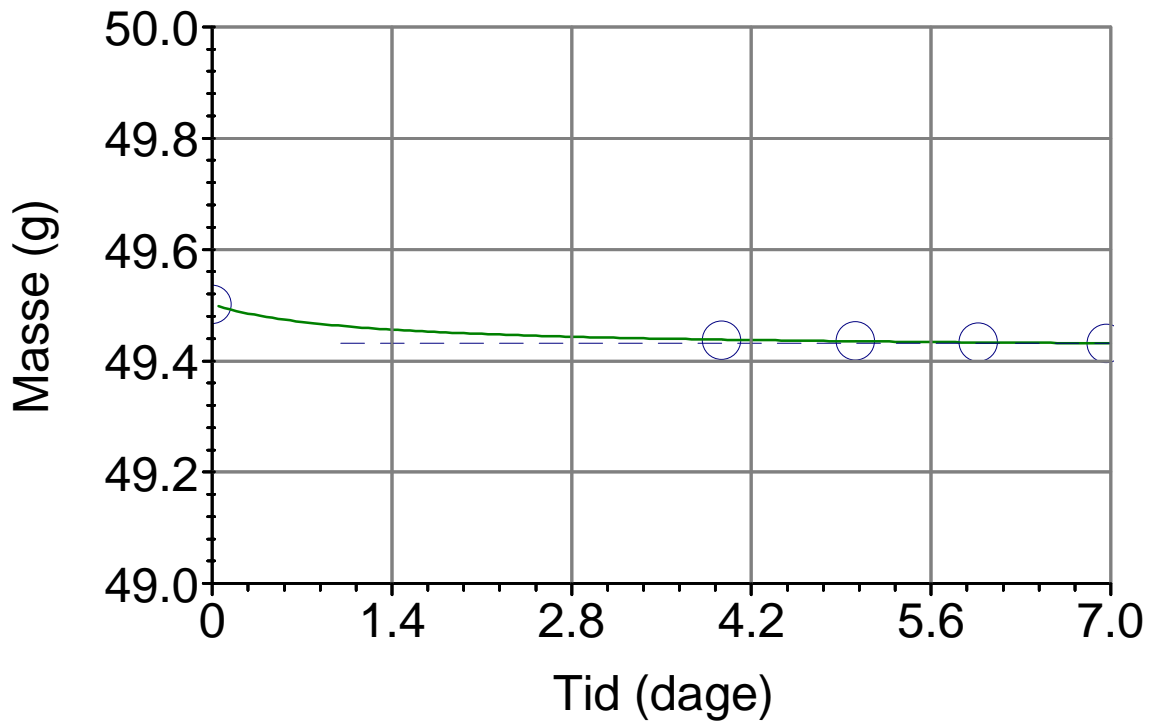
Indsvingning til ligevægt beregnes ud fra følgende udtryk, hentet fra /3/:

$$M_{\text{ligevægt}} = \left(1 + \frac{A \cdot t^p}{B + t^p}\right) \cdot k$$

hvor t er tiden. I tabel C1 angives værdier for konstanterne A, B, p og k baseret på henholdsvis 4 og 5 målinger på Perlite (ubehandlet) ved indsvingning fra 96% til 94% RF. Figur C2 viser de tilhørende indsvingningsforløb. Endelig angives størrelsen delta, der udtrykker hvorvidt ligevægtskriteriet er opfyldt eller ej, jf. rapportens afsnit 2.3.

Tabel C1 Værdier for konstanter i det matematiske udtryk til fastlæggelsen af masseligerægt og delta-værdi. Perlite (ubehandlet). RF ændres fra 96 til 94%.

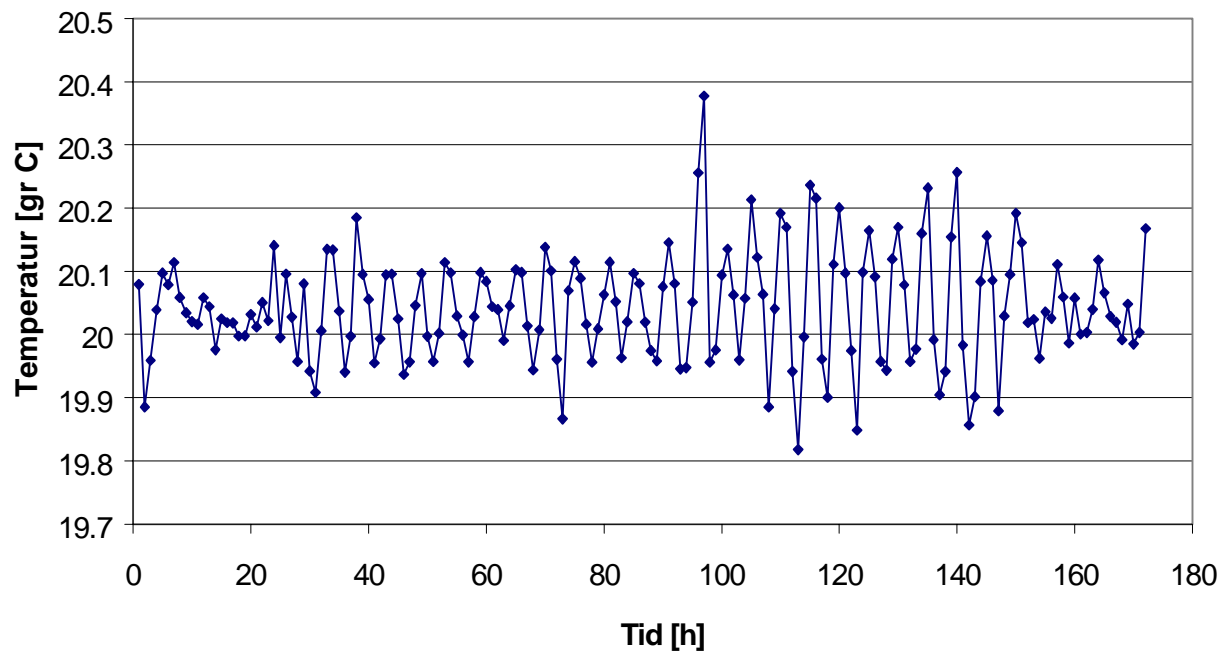
Konstant	4 målinger	5 målinger
A	- 0.0016	- 0.0021
B	1.1073	2.7452
P	1.0	1.0
k [g]	49.501	49.501
$M_{\text{ligevægt}}$ [g]	49.431	49.422
Delta	-	0.0001



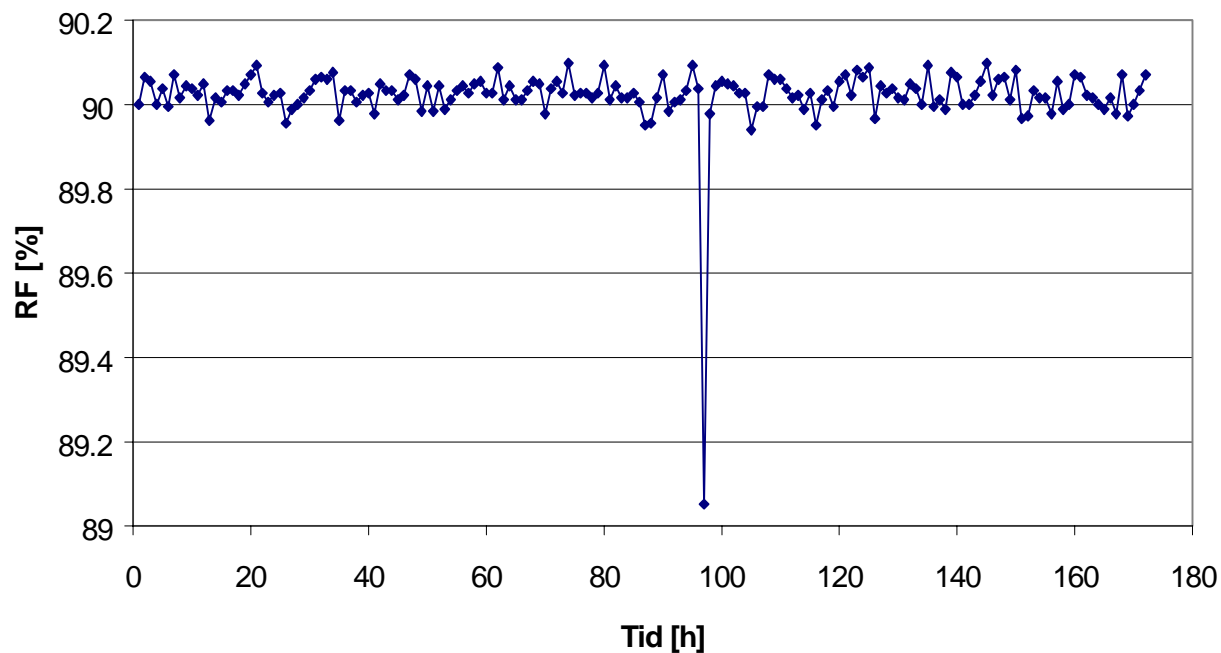
Figur C2 Indsvingningskurver for Perlite (ubehandlet) ved indsvingning fra 96% til 94% RF, baseret på 4 målinger (øverst) og 5 målinger (nederst), fraregnet målepunktet yderst til venstre.

De to figurer herunder er eksempler på hvor præcist styringen af klimaet kan udføres i den aktuelle opstilling ved 20°C og 90% RF. De dækker samme periode på ca. 1 uge for henholdsvis temperatur og RF.

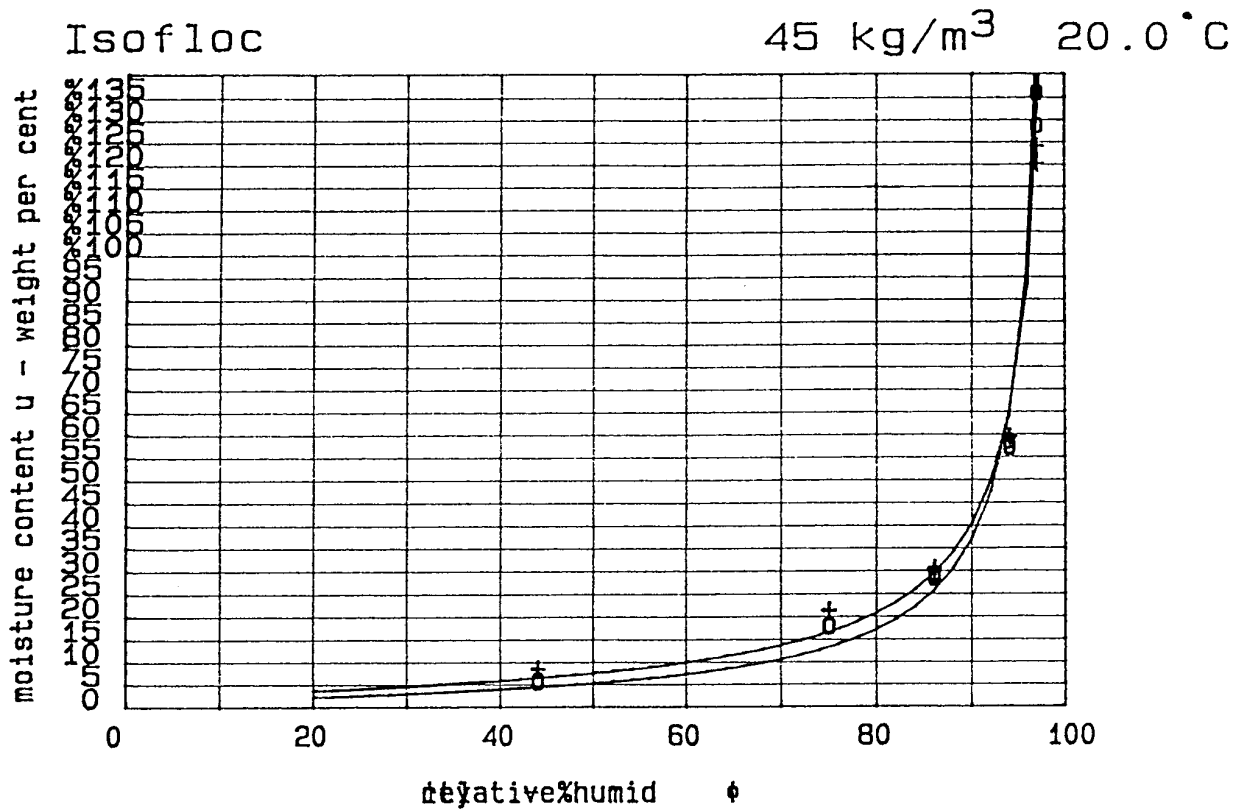
**Data for klimakammer BKM
20 grader C, 90% RF**



**Data for klimakammer BKM
20 grader C, 90% RF**



Appendix D - Sorptionsisotermer fra litteraturen



+ measured desorption values

ϕ	97.0	97.0	94.0	94.0	86.0	86.0	75.0	75.0	44.0	44.0
u	119.2	123.9	99.2	59.2	30.3	29.7	21.1	20.9	8.3	8.3

Approximation:

$$u = 15.02E+2 * \exp((-1/1.10) * \ln(1 - \ln(\phi) / 19.89E-4))$$

+ measured adsorption

ϕ	44.0	44.0	75.0	75.0	86.0	86.0	94.0	94.0	97.0	97.0
u	5.7	5.4	17.7	17.5	28.2	29.0	58.2	56.9	135.8	128.4

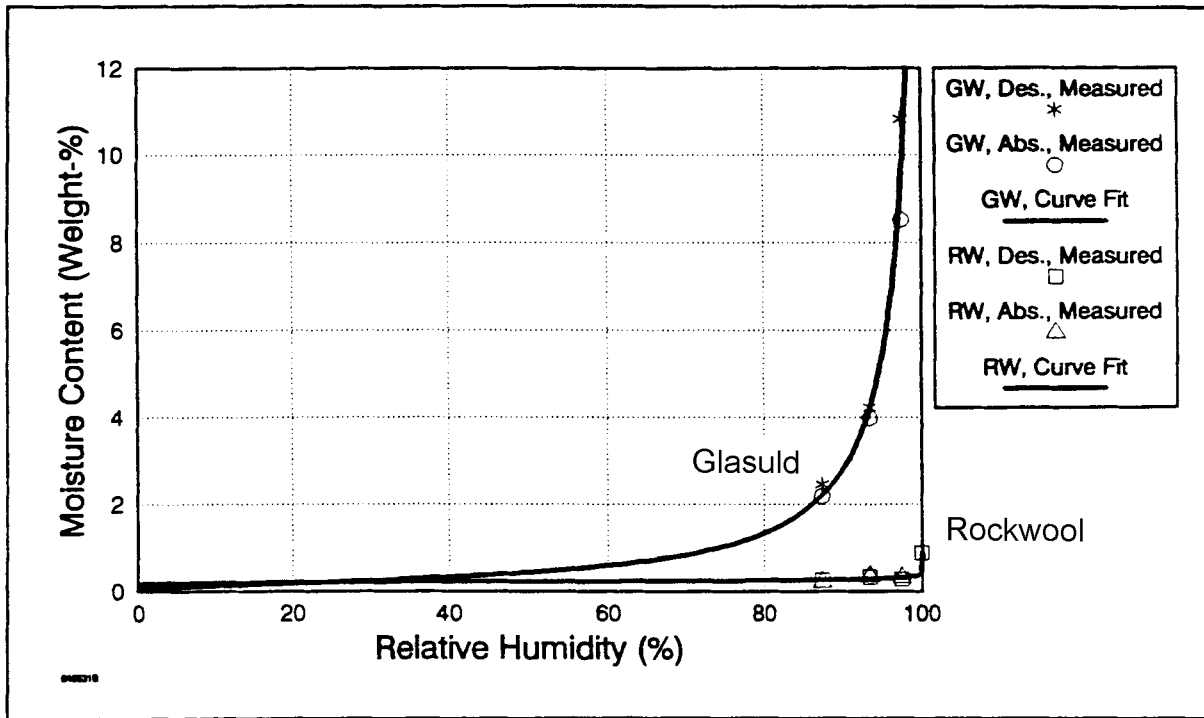
Approximation:

$$u = 22.32E+2 * \exp((-1 / .95) * \ln(1 - \ln(\phi) / 21.68E-4))$$

No scanning values

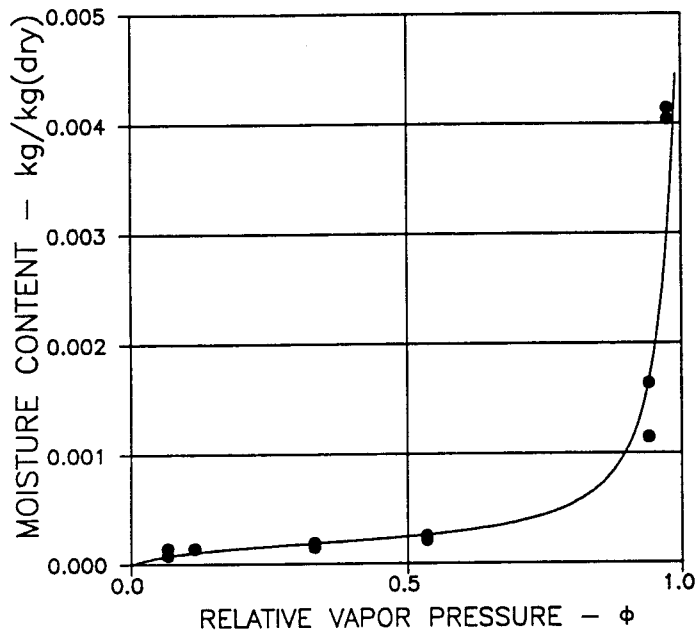
Törret ved 50 °C.

Figur D1 Sorptionsdata for papirisoleringsproduktet Isofloc med densitet 45 kg/m³, fra /5/.



Figur D2 Sorptionsisotemer for mineraluldsprodukter, fra /6/. Glasuld Type 36 TFP-M, densitet 122 kg/m³. Rockwool Type A - Underlagsplade, densitet 136 kg/m³.

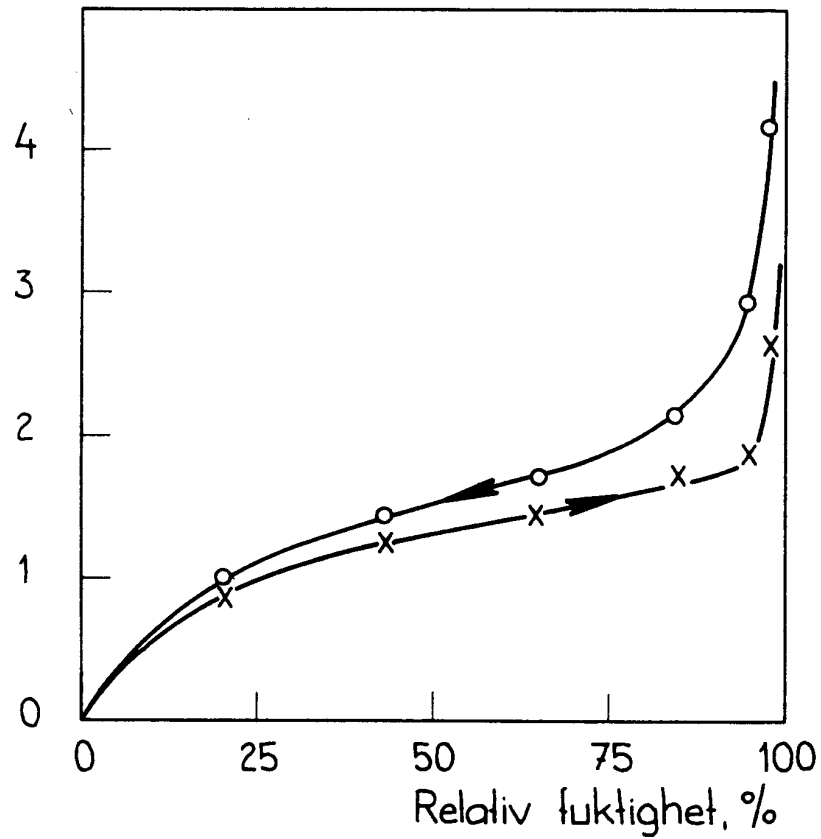
• = measured adsorption values:



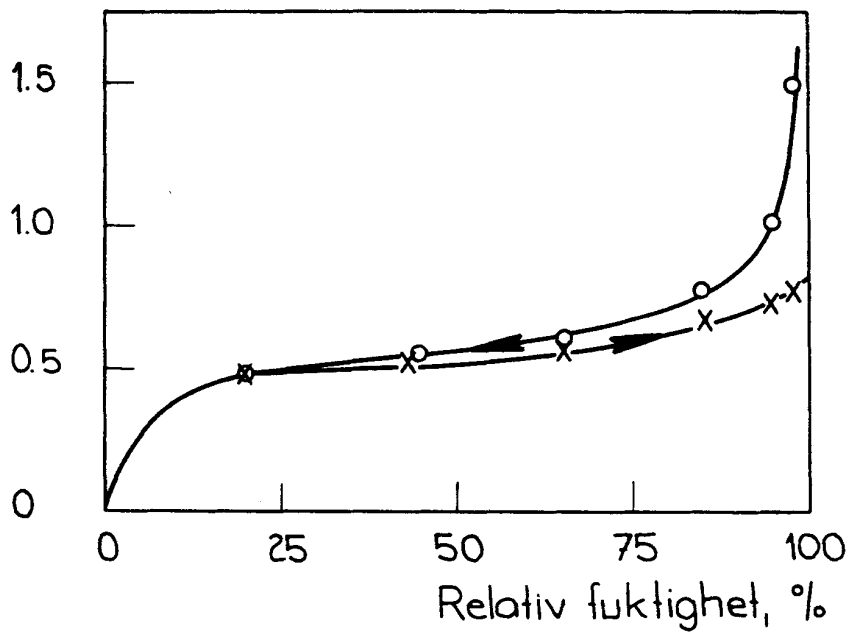
ϕ [-]	u [kg/kg(dry)]
0.065	0.00008
0.065	0.00014
0.113	0.00014
0.329	0.00015
0.329	0.00019
0.535	0.00025
0.535	0.00021
0.940	0.00164
0.940	0.00115
0.974	0.00414
0.974	0.00404

Figur D3 Sorptionsisoterm for Leca med densitet 290 kg/m³. $\phi = RF$. Gengivet efter /8/.

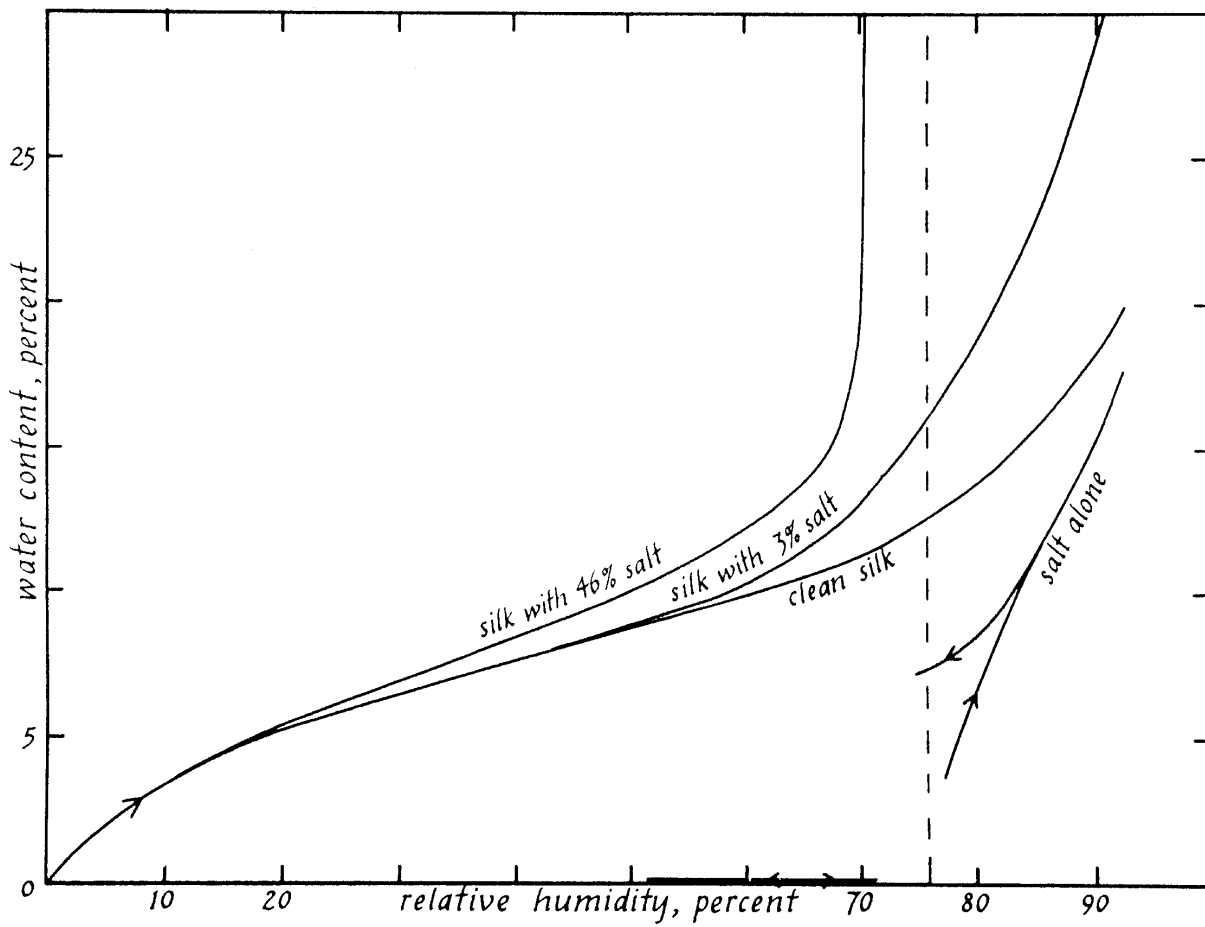
Fuktkvot, viktsprocent



Fuktkvot, viktsprocent



Figur D4 Sorptionsisotermer. a: glasuld med densitet 18 kg/m^3 , b: stenuld med densitet 42 kg/m^3 , fra /7/.



Figur D5 Sorptionsisotermer for silke, salt (NaCl) samt kombinasjoner af disse, fra /9/.

INSTITUT FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER OG MATERIALER
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

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

SERIE R

(Tidligere: Rapporter)

- R 35. ANDERS BOE HAUGGAARD – NIELSEN: Mathematical Modelling and Experimental Analysis of Early Age Concrete. 1997.
- R 36. JUN YING LIU: Plastic Theory Applied to Shear Walls – Load – Carrying Capacity of Shear Walls. 1997.
- R 37. WILLIAM E. WARREN OG ESSEN BYSKOV: Micropolar and Nonlocal effects in Spatially Periodic, Two – Dimensional Structures. 1997.
- R 38. NIELSEN, LAUGE FUGLSANG: Modified Dugdale Crack Models. 1998.
- R 39. POULSEN, JOHANNES SAND: Compression in Clear Wood. 1998.
- R 40. COLLETTE, FRÉDÉRIC S.: A Combined Tuned Absorber and Impact Damper. 1998
- R 41. ZHANG, JUN.: Fatigue Fracture of Fibre Reinforced Concrete-An Experimental and Theoretical Study.
- R 42. OLSEN, DAVID HOLKMANN: Concrete Fracture and Crack Growth A Fracture Mechanics Approach 1998
- R 43. HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Determination of the Fracture Energy of Concrete- Comparison of the TPBT and the WST Method 1998
- R 44. NIELSEN, LAUGE FUGLSANG: Modified Dugdale cracks and Fictitious cracks
- R 45. CHRISTIANSEN, MORTEN BO: Crack Tip Stress Field Modelling. 1998
- R 46. JENSEN, MEJLHEDE OLE: Clinker mineral hydration at reduced relative humidities
- R 47. JENSEN, MEJLHEDE OLE: Influence of temperature on autogenous deformation and RH-change in hardening cement paste
- R 48. HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Holdbarhed af fiberarmeret beton og revnet beton. 1998.
- R 49. LANGE-HANSEN, P.: Comparative Study of Upper Bound Methods for the Calculation of Residual Deformations after Shakedown. 1998.
- R 50. KELLEZI, LINDITA: Dynamic Soil-Structure-Interaction. Transmitting Boundary for Transient Analysis. 1998.
- R 51. MEJLHEDE JENSEN, OLE: Chloride ingress in cement paste and mortar measured by Electronic Probe Micro Analysis. 1999
- R 52. KLENZ LARSEN, POUL: Desalination of painted brick vaults. 1999
- R 53. GERMAN HAGSTEN, LARS. GUDMAN-HØYER, TIM. ZENKE HANSEN, LARS OG NIELSEN, M.P: Eksperimentel bestemmelse af tegl bjælkers bæreevne. 1999
- R 54. PADFIELD, TIM: The Role of Absorbent Building Materials in moderating changes of Relative Humidity. 1999
- R 55. TEOH, B.K., HOANG, L.C. OG NIELSEN, M.P.: Shear Strength of Concrete I-Beams- Contributions of Flanges. 1999
- R 56. WEIQING, LIU. NIELSEN, M.P. DAJUN, DING: Experimental Study on the Shear Transfer Across Cracks in Reinforced Concrete. 1999
- R 57. HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Produktionsprocesser og hygrotekniske egenskaber for isoleringsmaterialer - Leverandør/producentoplysninger. Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternativ isoleringsmaterialer. 1999