



LUND UNIVERSITY

Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial

Ahlgren, Lennart

1972

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Ahlgren, L. (1972). *Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial*. [Doktorsavhandling (monografi), Avdelningen för Byggnadsmaterial]. Tid. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
THE LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

FUKTFIXERING I PORÖSA BYGGNADSMATERIAL

MOISTURE FIXATION IN POROUS BUILDING
MATERIALS

LENNART AHLGREN

DUPLI-KONSULT
Eslöv 1972

BETECKNINGAR	5
FÖRORD	7
1 INLEDNING	9
2 VATTEN	13
2.1 Vattenmolekylen	13
2.2 Vattnets struktur	14
2.3 Vattnets fysikaliska egenskaper	16
3 FIXERING AV VATTEN I MATERIAL	19
3.1 Allmänt	19
3.2 Kemisk bindning	23
3.3 Fysikalisk bindning	28
3.3.1 Adsorption	28
3.3.2 Kapillär kondensation	34
3.3.3 Osmotisk bindning	39
4 ISOTERMEN	42
4.1 Allmänt	42
4.2 Absorption och desorption	45
4.2.1 Allmänt	45
4.2.2 Orsaker till hysteresis	48
4.2.3 Scanning	56
4.3 Beräkningsteori	59
4.4 Inverkan av temperaturen	64
5 BESTÄMNING AV ISOTERMER FÖR BYGGNADSMATERIAL	69
5.1 Apparatur	69
5.1.1 Allmänt	69
5.1.2 Beskrivning	70
5.1.3 Användning	73
5.1.4 Noggrannhet	75
5.2 Försöksmetodik	76
5.3 Försöksresultat	77

6	BESTÄMNING AV SPECIFIKA YTOR	81
6.1	Allmänt	81
6.2	Beräkning av specifika ytor med BET-teori	84
6.2.1	Metodik	84
6.2.2	Resultat	85
7	BESTÄMNING AV PORSTORLEKSFÖRDELNINGAR	87
7.1	Allmänt	87
7.2	Beräkning av porstorleksfördelningar	90
7.2.1	Beräkningsmodell	90
8	BERÄKNING AV ABSORPTIONSISOTERMER FÖR BETONG	95
8.1	Allmänt	95
8.2	Beräkning av absorptionsisotermer för cementpas- tor	96
8.3	Resultat	100
9	DISKUSSION AV RESULTAT	105
9.1	Allmänt	105
9.2	Cementbundna material	107
9.3	Högtrycksånghärdade material	115
9.4	Keramiska material	116
9.5	Trä och träbaserade material	116
9.6	Diverse material	118
	SAMMANFATTNING	120
	SUMMARY	122
	LITTERATURFÖRTECKNING	124
	BILAGA I	131
	Absorptions- och desorptionsisotermer för porösa bygg- nadsmaterial vid +20°C	
	BILAGA II	183
	Anpassning av BET-teorin till absorptionsisotermer enligt bilaga I	

BE/TECKNINGAR

- A = yta, m^2
- A_m = yta hos adsorberad molekyl, \AA^2
- B = barometerstånd, mmHg eller kp/cm^2
- b = en konstant
- C = cementhalt, kg/m^3
- C_p = specifika värmnet, J/K
- d = molekyl diameter, \AA
- E = inre energi, J/mol
- F = elektrisk fältstyrka, V/m
- G = fri energi, J/mol
- k = en konstant
- L = vattenångans kondensationsvärme, J/mol
- l_o = lufthalt hos färsk betong, %
- M = molekylvikt, kg/mol
- N = Avogadros tal, 1/mol
- n = antal (moler eller adsorberade skikt), 1
- P = totaltryck, N/m^2 eller kp/cm^2
- p = vattenångans partialtryck, N/m^2 eller mmHg
- Q = adsorptionsvärme, J/mol
- q_d = differentiella adsorptionsvärmnet, J/mol
- q_{st} = isostera adsorptionsvärmnet, J/mol
- R = gaskonstanten J/mol·K
- RF = relativa fuktigheten, %
- r = porradie, \AA eller avstånd, m
- S = entropi, J/mol·K
- T = absolut temperatur, K
- t = skikt tjocklek, \AA
- U = bindningsenergi, J/mol
- u = fuktkvot, %
- V = volym, m^3

- V_m = monomolekylär kapacitet, kg/m^3
 vct = vattencementtal = w_0/C , l
 X = andel
 x = fuktkvot, kg/kg
 x_m = monomolekylära kapaciteten, kg/kg
 w = vattenmängd, kg/m^3
 $\alpha = \frac{w_n/C}{0,25} = \text{hydratationsgrad}$, l
 $\beta = \frac{\alpha}{2,5 vct} = \text{hydratationsgrad}$, l
 γ = ytspänning, J/m^2
 ϕ = relativ fuktighet, l
 θ = randvinkel eller vinkel, rad
 μ = kemisk potential, J/mol
 u = andel moler i en lösning, l
 π = yttryck, N/m
 ρ = densitet, kg/m^3 eller krökningsradie, Å
 σ = tjocklek i medeltal hos ett molekylskikt, Å

Index

- a = adsorberat eller absorption
ab = absorberad i ballast
ap = absorberad i cementpasta
b = ballast
c = kapillär
d = desorption
e = jämvikt
g = gel
k = Kelvin-radie eller kontraktion
m = material
n = icke-förångningsbart
o = begynnelse
p = por eller pasta
s = mätnad
v = vattenånga
w = vatten

FÖRORD

Detta arbete har till stor del finansierats av Statens Råd för Byggnadsforskning genom anslag som beviljats professor Sven G Bergström vid avd för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund.

Fuktforskningen vid avd Byggnadsmateriallära behandlar fuktfixering, fukttransport och fuktmätning. Denna rapport utgör slutrapport beträffande det första av dessa tre områden. Bestämning av sorptionsisotermerna kommer emellertid även i fortsättningen att utföras i den vid avdelningen uppbyggda utrustningen.

Även om rapportens innehåll till stora delar endast är av intresse för dem som bedriver forsknings- eller utvecklingsarbete, bör dock de redovisade resultaten ha direkt praktisk användbarhet. Kännedom om sorptionsisotermerna har visat sig utgöra en nödvändig förutsättning för en korrekt behandling av de flesta byggnadstekniska fuktproblem

Initiativtagare till forskningsarbetet är professor Sven G Bergström. Han har bidragit med en mängd idéer och på ett enastående sätt inspirerat hela sin omgivning. Jag är skyldig honom stort tack.

Jag vill även tacka professor Bo Adamson, civilingenjörerna Mark Bomborg och Göran Fagerlund för många intressanta diskussioner.

Detta arbete hade inte varit möjligt att genomföra utan hjälp av och samarbete med personalen vid avd Byggnadsmateriallära. Främst vill jag tacka Allan Berlin, Leif Erlandsson, Ingemar Larsson, Sture Sahlén, Anni-Britt Wärmark (som har svarat för utskrift av manuskriptet) och Britt Andersson (som har ritat figurerna).

Sist men inte minst vill jag tacka min hustru Birgitta för bl a hjälp med granskning och korrekturläsning av manuskriptet.

Lund i oktober 1972

Lennart Ahlgren

1 INLEDNING

Alla byggnadsmaterial utövar sin funktion i en miljö, där vatten förekommer. Oftast sker kontakten med vatten i form av ånga i den omgivande luften. Materialen kan även intermittant eller kontinuerligt utsättas för vatten i vätskefas, t o m för vatten under övertryck. Många material tillförs dessutom vatten vid tillverkningen.

Alla porösa byggnadsmaterial innehåller vatten i större eller mindre utsträckning i sin normala funktion. Mängden vatten i ett material och hur detta vatten är bundet till materialet har en i många avseenden väsentlig betydelse för materialets egenskaper. Sålunda påverkas bl a ett materials hållfasthet, deformationsegenskaper, krympning- svällning, värmeisoleringsförmåga, beständighet och strålningsabsorptionsförmåga av fuktinnehållet i materialet. Grundläggande kunskaper om hur vattnet samverkar med fasta material är därför inte bara nödvändiga för dem som sysslar med fukt och fukttransport i material, utan även för dem som sysslar med materialegenskaper överhuvudtaget. Lösning av fukttransportproblemen i porösa byggnadsmaterial utan att ta hänsyn till hur vattnet binds till materialet vid olika fuktinnehåll går ej att åstadkomma. Vidare är det ej möjligt att utföra grundläggande realistisk forskning om de porösa byggnadsmaterialens egenskaper utan att känna till växelverkan mellan materialet och dess fuktinnehåll.

Föreliggande arbete behandlar bindningen av vatten vid porösa byggnadsmaterial, som befinner sig i luft med varierande fuktighet. Vattnets möjligheter att bindas vid olika material, och hur mycket vatten som binds under varierande förutsättningar studeras och analyseras. Huvudavsikten med arbetet är att studera de vattenmängder, som binds vid olika porösa byggnadsmaterial vid jämvikt med den omgivande luften. Dessa vattenmängder beskrivs av de sk sorptionsisotermerna. Vattnets fixering vid den successiva uppbyggnaden av isotermerna och jämviktsfuktkvotens beroende av om jämviktstillståndet nåtts under torkning eller uppfuktning utgör exempel på problem som behandlas. Av intresse är emellertid även att studera isotermernas uppbyggnad, utseende och nivå för olika materialtyper inom en viss materialfamilj. Att kunna sammanfatta och systematisera isotemer inom en materialfamilj eller finna metoder att beräkna isotemer är av mycket stort intresse. Floran av olika materialtyper och materialvarianter är nämligen så rik, att man knappast har möjlighet att experimentellt fastställa isotemer för dem alla.

Ett stort antal isotermer har bestämts för att erhålla underlag för de ovan angivna studierna. Isotermerna har även bestämts, därför att det är av stort intresse att känna till hur mycket vatten, som binds vid ett material i ett visst klimat. Detta är inte minst intressant för att känna till sluttilståndet vid en uttorkningsprocess. Vidare saknas desorptionsisotermer i det närmaste helt i litteraturen.

Arbetet omfattar i stort sett två delar. Den första delen behandlar de teorier om fixering av gaser och ångor vid fasta material, som kan vara av intresse i samband med porösa byggnadsmaterial. Av stort intresse är härvid även vattenmolekylens speciella egenskaper, vilken ger upphov till helt andra förutsättningar än vid fixering av andra gaser och ångor.

Vidare redogörs för de fysikaliska och i viss utsträckning de kemiska bindningsformer, som är verksamma. Isotermens uppbyggnad, skillnaden mellan absorptions- och desorptionsisotermen samt hur kurvorna förlöper mellan de båda ytterlighetskurvorna diskuteras.

Arbetets andra del behandlar bestämning och analys av absorptions- och desorptionsisotermer med de presenterade teorierna som bakgrund. I ett kapitel redovisas den utrustning som använts och de erhållna försöksresultaten. Med hjälp av försöksresultaten beräknas därefter bindningsenergi, specifika ytor och porstorleksfördelningar. En metod för beräkning av absorptionsisotermer för olika betongtyper redovisas. I det avslutande kapitlet analyseras och diskuteras erhållna resultat och gjorda beräkningar.

Studierna är utförda med ett starkt och självklart krav på att arbetet skall ha direkt praktisk anknytning. Strävan har inte varit att arbeta på en nivå jämförbar med de grundläggande studier, som utförs beträffande cementpastans struktur och strukturen hos trä. Ett önskemål har emellertid varit att kunna utnyttja resultaten från sådana studier och att kunna överbrygga kunskapsklyftan här emellan och den påtagligt praktiska användningssidan.

Ett flertal fundamentala arbeten har skrivits, som behandlar bindning av gaser och ångor vid olika material. Brunauer (1943), Gregg och Sing (1967) samt Young (1962) utgör exempel härpå. Deras arbeten behandlar emellertid i mycket liten omfattning fixering av vattenånga vid porösa material av den typ som byggnadsmaterial representerar.

Beträffande fixering av vatten vid porösa byggnadsmaterial kan nämnas studierna av Powers och Brownyard (1948), Kollman (1959), Wittmann (1967), Johansson och Persson (1944) och Tveit (1966). De två senare verken är de enda, där systematiska bestämningar av isotermer för byggnadsmaterial förekommer. Dock har inga desorptionsisotermer bestämts.

Vid de teorier och modeller som diskuteras nedan har i flera fall mycket stora förenklingar gjorts, beträffande bindningen av vatten och materialens utseende. En bunden vattenmolekyl sitter inte stilla på materialytan. Den rör sig i ytans plan och lämnar mycket hastigt ytan för att genast ersättas av en ny molekyl. Luftens molekyler bombarderar oupphörligen materialytan. Vissa molekyler studsar mot ytan och vissa binds till densamma.

Vad beträffar materialens utseende är det framför allt dess por-system som är av intresse. Först kan man fråga sig vad en por är för någonting. I detta arbete anses varje utrymme, där det sitter en förångningsbar vattenmolekyl utgöra en por. Härvid har naturligtvis torkningsmetodikens stor betydelse. Porerna förutsätts ofta ha form som sfärer eller cylindrar med definierade porradier. Man bör emellertid hela tiden hålla i minnet, att detta är förenklingar. Fig 1 och 2 ger exempel på hur porerna kan se ut i verkligheten.

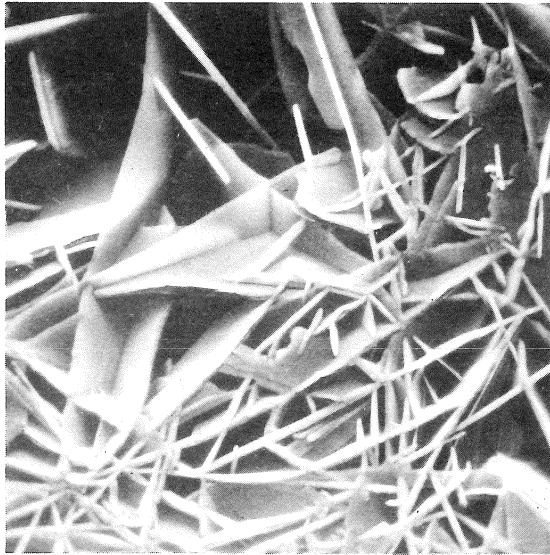


FIG 1 Svepelektromikroskopbild av gasbetong.
Scanning Electron Microscope picture of cellular concrete.

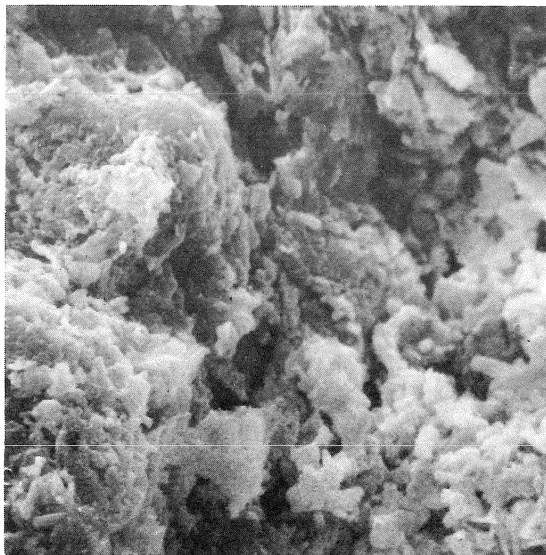


FIG 2 Svepelektromikroskop av lösbränt tegel.
Scanning Electron Microscope picture of light burnt brick.

2 VATTEN

2.1 Vattenmolekylen

Fixering av vatten i material är i många avseenden beroende av vattenmolekylens natur. Vattenmolekylens i många avseenden speciella egenskaper gör att sorption av vattenånga i fasta kroppar skiljer sig från sorption av andra gaser och ångor.

Syreatomen med sitt yttre ofyllda elektronskal bildar kovalenta bindningar med elektronerna hos två väteatomer. Syreatomens två redan fyllda orbitaler, som ej deltar i bindningen, bildar två lober på den sida av syreatomen, som vetter bort från väteatomerna. Fig 3 visar den tetraederliknande konfiguration, som har stor betydelse vid uppbyggnaden av isens och vattnets struktur.

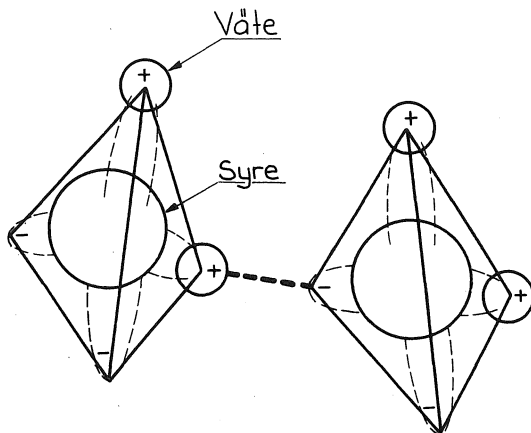


FIG 3 Vattenmolekylens tetraederliknande uppbyggnad och vätebindning mellan två molekyler.

The tetrahedral bonding within a water molecule and the hydrogen bonding between two molecules.

Vinkeln H-O-H är $104,5^\circ$ och avstånden mellan atomtyngdpunkterna framgår av fig 4. Vattenmolekylen, som alltså är mycket liten och därför kan penetrera de finaste porer, har en effektiv diameter på ungefär 3,5 Å. Molekylens volym är ca 30 \AA^3 i vätskefas. Den yta som upptas per vattenmolekyl i ett monomolekylärt skikt är ca $10,6 \text{ \AA}^2$. Detta senare värde varierar något beroende på beskaffenheten hos den adsorberande ytan.

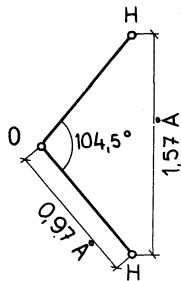


FIG 4 Schematisk bild av vattenmolekylen.

Sketch in outline of the water molecule.

Eftersom den kovalenta bindningen sker mellan atomer av olika slag i syremolekylen, delas inte elektronerna lika mellan de båda atomerna. Elektronerna tillbringar i medeltal en längre tid i närheten av syreatomens kärna. Syreatomen blir negativ och väteatomen positiv. Två dipoler existerar således mellan syreatomen och de båda väteatomerna. Dessa dipoler adderas vektoriellt, varför vattenmolekylen är starkt polariserad. Det permanenta dipolmomentet gör, att vattenmolekylen omger sig med ett relativt starkt elektriskt fält. Vattenmolekylen uppvisar därför en hög affinitet till de flesta adsorbenter.

Väsentligt för vattenmolekylens bindning till andra molekyler samt för vattnets struktur och egenskaper är även den positiva väteatomens förmåga att genom elektrostatisk attraktion binda andra starkt negativa atomer till sig.

Denna negativa atom kan utgöras av en syreatom i en annan vattenmolekyl. Den uppkomna bindningen kallas vätebindning. Den positiva väteatomen håller alltså samman två negativa atomer, där avståndet till syreatomen i vattenmolekylen är mindre än till den "främmande" negativa atomen. Vidare är den kovalenta bindningen starkare än vätebindningen.

2.2 Vattnets struktur

Vatten **skiljer** sig från alla andra vätskor. Detta beror i många avseenden på att vattenmolekylerna förblir starkt bundna till varandra även vid höga temperaturer, där molekyler av samma storleksordning bryter sina bindningar till följd av ökade termiska rörelser. Hur vattnets struktur verkligen ser ut, vet man inte med säkerhet, trots att brist på olika teorier inte föreligger.

En naturlig utgångspunkt för diskussion av det flytande vattnets struktur är att starta med isens struktur. Denna är väl känd för vanlig is eller is I. Varje syreatom befinner sig i centrum av en tetraeder, bildad av fyra syreatomer. Vattenmolekylerna är bundna med vätebindningar till sina fyra närmaste grannar. Härvid erhålls ett öppet kristallgitter, som består av hexagonala ringar. Mellan dessa ringar bildas tomma schakt, som gör att isens densitet blir låg.

Is uppträder under inverkan av högt tryck även i andra former. Hos is II och III t ex är, på samma sätt som hos is I, vattenmolekylerna bundna med vätebindningar till sina fyra närmaste grannar. Tetraederformen är emellertid mindre regelbunden än i is I och vätebindningarna är kortare, vilket gör att avståndet mellan icke-vätebundna molekyler blir mindre. Detta resulterar i en större densitet. Densiteten hos is II är ungefär 1170 kg/m^3 .

Flera av vattnets egendomliga egenskaper har givit upphov till antagandet att flytande vatten måste innehålla någon slags isliknande struktur. När is smälter, skulle vattenmolekyler frigöras från gittret och ockupera hålrummen i gittret. Den tomma gitterpunkten kan vandra genom isstrukturen till dess yta och där försvinna. Härvid erhålls en volymminskning eller en densitetsökning.

I en annan modell antar man, att vattenmolekylerna är arrangerade i månghörniga burar sammanhållna av vätebindningar. Dessa isliknande samlingar kollapsar och återbildas ca 10^{11} gånger per sekund. I och emellan dessa sammanslutningar rör sig andra vattenmolekyler, bundna med starka van der Waalskrafter.

Enligt bland andra Derjaguin och Fedyakin (1962) existerar en typ av vatten kallad supervatten med egenskaper, som avviker från egenskaperna hos vanligt vatten. Densiteten är t ex ungefär 1400 kg/m^3 . Förekomsten av supervatten har i de flesta fall påvisats i kapillärrör, som har en diameter som understiger $100 \mu\text{m}$. I samtliga fall har kapillärrören varit tillverkade av någon kiselförening. Fullständig klarhet råder inte beträffande vilka förutsättningar som är nödvändiga för att supervatten skall bildas. De flesta forskare på området är emellertid överens om att relativa fuktigheten måste överstiga 93 %.

Orsakerna till förekomsten av supervatten är fortfarande oklara. Olika teorier har framförts. Enligt Derjaguin m fl skulle, på grund av inverkan från kapillärväggarna, längden hos vätebyggnaderna mellan molekylerna minska i supervatten jämfört med vanligt vatten. En mer tätpackad struktur erhålls härigenom och därmed större densitet. På samma sätt som vanligt vatten kan anses motsvara is I, kan analogt supervatten anses motsvara is II. Supervatten skulle alltså utgöra en strukturellt modifierad form av vanligt vatten.

Enligt Everett, Haynes och McElroy (1970) skulle emellertid egenskaperna hos supervatten bero på i vattnet upplösta ämnen. Supervattnet skulle härvid utgöras av någon form av kisel- eller silikatgel.

Förekomsten av supervatten kan vara mycket intressant i samband med fixering av fukt i porösa material. De förutsättningar som krävs för att bilda supervatten måste ofta råda i naturen. Det är således mycket troligt att supervatten kan påträffas i porösa byggnadsmaterial under vissa omständigheter. De flesta materialen har porer med diametrar som understiger 100 μm , och många material är uppbyggda av olika kiselföreningar. De kapillärrör i vilka man har påvisat supervatten har inte enbart varit uppbyggda av silikater, och inget tyder på, att det är svårare att framställa supervatten i rör som innehåller en lägre kiselhalt. Tegel och cementbundna material är till stor del uppbyggda av silikater samt har en stor andel av sina porer i området under 100 μm . Dessa material utgör alltså exempel, där förekomst av supervatten är fullt möjlig. De annorlunda egenskaperna hos supervatten (se 2.3) kan inom vissa områden ändra en del egenskaper hos de material, där det är närvarande.

2.3 Vattnets fysikaliska egenskaper

För att uppfylla sin mångsidiga uppgift i naturen uppvisar vatten en rad påfallande egenskaper och antar i många avseenden en särställning. Det förhållandet, att densiteten hos den fasta fasen är mindre än hos smältan, delas endast av ett par andra ämnen. Vidare är densiteten störst vid ca $+4^{\circ}\text{C}$ och avtar alltså för både kallare och varmare vatten. Detta trots att molekyltätheten ökar vid ökande temperatur, vilket torde bero på att molekylerna är starkt bundna till varandra även vid höga temperaturer.

Vatten har det högsta specifika värmnet av alla ämnen. De förhållandenvis höga smält- och kokpunkterna, den höga viskositeten och den stora ytspänningen utgör alla resultat av de starka krafterna mellan molekylerna. Så när som på kvicksilver har vatten den största ytspänningen av alla vätskor.

Vattenmolekylens stora, permanenta dipolmoment gör, att vattnets dielektricitetskonstant blir stor. Detta förhållande utnyttjas i ett flertal metoder för att mäta fukttinnehåll i porösa material. Dipolmomentet hos vattenmolekylen förklarar vidare, varför vatten är ett så utmärkt lösningsmedel. Det starka elektriska fältet kring vattenmolekylen bryter relativt lösa intermolekylära bindningar i andra ämnen.

Kännedom om egenskaperna hos fritt vatten är emellertid inte tillräckliga, då man är intresserad av det vatten som är bundet i olika material. Egenskaperna hos detta vatten har inte bara betydelse för fuktfixering och fuktvandring, utan även andra material-egenskaper såsom frostbeständighet, krypning och krympning påverkas.

Vattnets egenskaper ändras vid växelverkan med det fasta materialet. Strukturella ändringar hos vattenskiktet närmast materialytan kan ske. Inverkan av kraftfältet från materialets molekyler kan även ge ändrade egenskaper hos vattnet, utan att strukturella ändringar sker. Närvaro av främmande joner ändrar även vattnets egenskaper.

Vad beträffar supervatten har man funnit egenskaper, som markant avviker från egenskaperna hos fritt vatten. Densiteten har man kunnat bestämma till ca 1400 kg/m^3 . Supervatten förekommer emellertid inte i rent tillstånd utan som en lösning i vanligt vatten.

Densiteten hos vatten i fina porer kan således variera mellan 1000 och 1400 kg/m^3 . Supervatten uppvisar linjär densitetsminskning med ökande temperatur. Något maximum saknas alltså vid $+4^\circ\text{C}$. Viskositeten hos supervatten är vid $+20^\circ\text{C}$ ca 20 gånger större än hos normalt vatten, vilket kan ha betydelse för fukttransporten i ett material. Ytspänningen är endast obetydligt större för supervatten.

Egenskaperna hos vattnet i ett skikt närmast materialytan är intressant i samband med studium av frysmekanismer i porösa material. Fryspunkten hos det bundna vattnet ligger under noll och är beroende av de krafter, med vilka vattnet är bundet till materialet. De vattenmolekyllager som är närmast materialytan är så starkt bundna, att det är omöjligt att omorientera dem till att ingå i isstrukturen. Fryspunkten hos supervatten ligger mellan -10°C och -30°C . Temperaturer ned emot -70°C har uppmätts, innan supervatten har frusit till is.

3 FIXERING AV VATTEN I MATERIAL

3.1 Allmänt

Vatten kan bindas till ett material på ett flertal fysikaliskt och kemiskt helt olika sätt. Det kan fixeras i vätskeform till materialet nästan helt utan bindningskrafter. Bindning i molekyllär- eller ångform förekommer alltid. Vattnet kan vidare bindas så att det blir en del av materialets struktur, och vattenmolekylen kan härvid även helt förlora sin identitet.

Olika indelningsgrunder kan väljas för att beskriva vattnets bindning till ett material. Den enda vetenskapligt sett helt entydiga metoden att klassificera de olika bindningstyperna är efter bindningsenergin storlek eller storleken av ändringen i fri energi vid vattnets fixering.

Ur rent praktisk synpunkt är det emellertid ändamålsenligt att indela det bundna vattnet i två huvudgrupper, nämligen

1. Icke-förångningsbart
2. Förångningsbart

Denna indelning är emellertid ej entydig. Olika resultat kan erhållas beroende på vilken metod som används vid bestämning av de båda grupperna. Gränsen mellan de båda grupperna skär dessutom rakt genom vissa bindningstyper.

Vattenmolekyler som är kemiskt bundna till materialet och således utgör en del av materialets struktur kan ha bindningsenergier, som är mindre än de adsorberade vattenmolekylernas, vilka är starkast bundna. Redan vid måttlig uttorkning av ett cementbundet material kan en viss dehydratisering ske. Eftersom den vattenmängd som är fysikaliskt bunden inte kan bestämmas exakt, skiljer man istället mellan förångningsbart och icke-förångningsbart vatten. Gränsen mellan dessa är bestämd av något standardiserat uttorkningsförfarande. För ett flertal material är således inte referenstillståndet detsamma som materialets "torra" tillstånd, utan det bestäms av uttorkningsproceduren. Den i praktiken mest använda tekniken är torkning i ugn vid 105°C. Ett annat standardiserat förfarande är torkning över is vid -78,5°C (med hjälp av kolsyre-snö), så kallad D-torkning. Ett tredje standardiserat förfarande är torkning vid rumstemperatur över en blandning av $Mg(ClO_4)_2 \cdot 2H_2O$ och $Mg(ClO_4)_2 \cdot 4H_2O$ (dehydrit), så kallad P-torkning.

Vad beträffar mängden icke-förångningsbart vatten är torkning vid 105°C och D-torkning likvärdiga. Bl a Powers och Brownard (1948) har funnit att vid P-torkning har cementpasta över tio viktsprocent mer icke-förångningsbart vatten.

I samband med cementpasta skiljer man gärna mellan hydratvatten och porvatten. Stora åsiktsskillnader råder beträffande bindning av hydratvatten vid relativa fuktigheter över ca 20 % till redan hårdnad cementpasta. De olika åsikterna företräds främst av Powers (1968) resp Feldman och Sereda (1968) och har framkommit i samband med teorier om materialets krympning-svällning och modeller för cementpastans uppbyggnad. Enligt Powers förlorar cementpasta i huvudsak endast porvatten vid inte alltför kraftig uttorkning. Krympningen skulle därför orsakas av ytspänningskrafter, krafter till följd av "förhindrad adsorption" (se 3.3.1) och krafter från krökta vätskeytor. Feldman och Sereda vänder sig mot den sk hindrade adsorptionen och hävdar i stället att även strukturella förändringar inverkar på cementpastans fuktbetingade rörelser. Svällningsrörelser skulle orsakas av att vattenmolekyler binds i den skiktade tobermoritstrukturen, inte som adsorberat vatten utan som en strukturell och kemiskt bunden komponent mellan tobermorit-skikten, s k zeolitiskt vatten (se fig 5). Vid uttorkning kommer detta vatten att i huvudsak lämna den skiktade strukturen vid låga relativa fuktigheter. Vid uppfuktning skulle vattnet tillföras kristallaggregaten successivt, men först vid högre relativa fuktigheter skulle effekten av detsamma vara påtagligt märkbar.

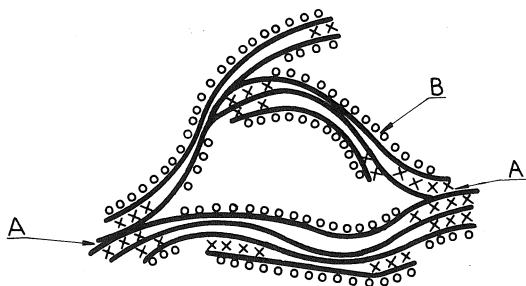


FIG 5 Förenklad modell av hydratiserad Portlandcement enligt Feldman och Sereda (1968).

Simplified model for hydrated Portland cement according to Feldman and Sereda (1968).

A-Bindning mellan skikt; Interparticle bonds.

B-Tobermoritskikt; Tobermorite sheets.

X-Vatten mellan skikten; Interlayer hydrate water.

o-Adsorberat vatten; Physically adsorbed water.

Denna senare teori kan jämföras med den stora svällningen hos en lera, när vatten utöver porvattnet tillförs leran. Vattnet befinner sig härvid mellan lerpartiklarna och skiljer dessa åt (se fig 6). I detta fall kan vattenskikten få en tjocklek på upp emot 100 molekyllager, men å andra sidan är krafterna mellan lerpartiklarna betydligt mindre än krafterna i tobermoritgelen.

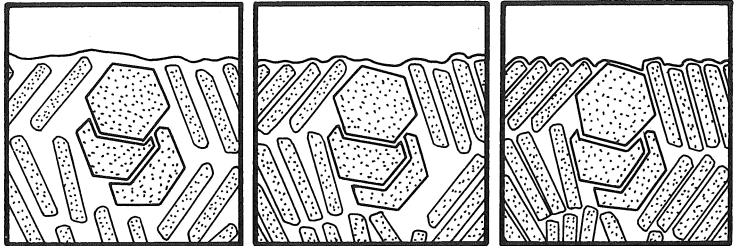


FIG 6 Vatten utöver porvatten skiljer lerpartiklar. Norton (1968).
Water in excess of pore volume separates clay particles.
Norton (1968).

Feldman och Sereda har vidare hävdad, att de specifika ytor och porvolym som bestäms av Powers är felaktiga. Man anser nämligen, att en stor del av det vatten, som kommer att räknas till det förångningsbara vid D-torkning, är vatten som legat mellan tobermoritskikten och som inte är adsorberat. Brunauer, Odler och Yudenfreund (1970) vänder sig bestämt mot Feldmans och Seredas teorier och resultat, som man anser vara baserade på uttorkningsförhållanden som inte kan betecknas som D-torkning och därmed är deras resultat inte jämförbara med andras. Brunauer et al hävdar, att Feldmans och Seredas uttorkning är mer att jämföra med P-torkning, och härvid skulle avsevärda mängder adsorberat vatten finnas kvar i cementpastan. Vid D-torkning försvinner emellertid både det adsorberade vattnet, och det vatten som finns mellan tobermoritskikten.

Wittmann (1971) har med hjälp av differential-termoanalys och kärnsppinnresons försökt skilja på andelarna hydratvatten och porvatten vid olika fuktnnehåll hos cementpasta. Wittmann kunde emellertid inte entydigt och kvantitativt skilja de båda bindningsformerna

åt. Han fann dock, att vid uppfuktning av en torkad cementpasta upptogs en jämfört med porvattenmängden icke försumbart liten mängd hydratvatten, och att vid relativa fuktigheter mellan 0 och 20 % en stor del av det upptagna vattnet utgörs av hydratvatten.

En ur fysikalisk-kemisk synpunkt gjord indelning av de olika bindningsformerna har framförts av Rebinder och i detalj återgivits av Lykow (1958). Huvudgrupperna i denna indelning är

1. Kemisk bindning
2. Fysikalisk-kemisk bindning
3. Fysikalisk-mekanisk bindning

Till det kemiskt bundna vattnet räknar Rebinder det som binds med jonbindning och med kovalent bindning i molekyllär form som kristallvatten. Det fysikaliskt-kemiskt bundna vattnet omfattar det adsorberade och det osmotiskt bundna, medan han hänför det vatten som binds i mikro- och makrokapillärer till det fysikaliskt-mekaniskt bundna (gränsen mellan mikro- och makrokapillärer går vid 1000 Å enligt Lykow). Det är tveksamt om man kan kalla något av det vatten, som binds i ett material för mekaniskt bundet. Även det svagast fixerade vattnet i de större porerna binds med kapillära krafter.

Powers och Brownyard (1948) indelar den totala vattenmängden i hårdnad cementpasta i följande tre kategorier:

1. Strukturellt bundet vatten
2. Adsorberat vatten
3. Kapillärt vatten

Till den tredje gruppen hör allt vatten som finns i materialets porer, utöver det som är bundet med ytkrafter till det fasta materialet. Denna grupp är alltså relativt stor och omfattar ett flertal bindningsformer. Powers och Brownyard hävdar även här, att en klassificering som den ovan angivna har liten praktisk betydelse. Vid en torkning kan man ej urskilja någon gräns mellan kategorierna 2 och 3. Ej heller existerar någon gräns mellan kategorierna 1 och 2 resp 3. Vid bestämning av förångningsbart och icke-förångningsbart vatten är, när det gäller cementpasta, bindningskrafterna förmodligen (se ovan) sådana att en del av det strukturellt bundna vattnet kommer att tillhöra det förångningsbara, medan en del av det adsorberade vattnet blir icke-förångningsbart.

I framställningen nedan behandlas de olika bindningsformerna indelade i två grupper:

1. Kemisk bindning
2. Fysikalisk bindning

Ur praktisk synpunkt är det ändamålsenligt att indela i dessa två huvudgrupper, eftersom de i stort sett överensstämmer med uppdelningen i förångningsbart och icke-förångningsbart vatten, som erhålls vid torkning vid 105°C , samtidigt som en klar gräns dras mellan de olika bindningsformerna.

3.2 Kemisk bindning

I ett flertal material ingår vatten på ett naturligt sätt i den strukturella uppbyggnaden. Ett utmärkt exempel härpå utgörs av de cementbundna materialen. Avlägsnande av det strukturella vattnet innebär i många fall att materialets egenskaper förloras. Beträffande cementpasta går kohesionen mellan de ingående delarna helt förlorad. Vatten byggs alltså i många fall in i materialets struktur i samband med tillverkningen. En kemisk bindning av vatten kan emellertid även ske, när materialet tagits i bruk. Kemisk reaktion sker inte bara i kontakt med fritt vatten i vätskefas utan även med vattenånga, s k kemisorption. Detta gäller inte endast för de cementbundna materialen utan även för andra material t ex tegel. Denna s k hydratisering ger en ökning av materialets torra vikt.

De bindningstyper som i verklig mening kan kallas kemiska i samband med fixering av vatten är jonbindning, kovalent bindning och vätebindning. Vid jonbindning är vattnet representerat av OH-grupper, som är starkt bundna till metalljoner. Vattenmolekylerna har alltså mist sin identitet.

Det är annorlunda då vattnet är bundet som kristallvatten, varvid vattenmolekylen behåller sin identitet och utgör en enhet i strukturen. Kristallvattnet förekommer starkt bundet till materialet med kovalenta bindningar och vätebindningar och räknas härvid till det icke-förångningsbara vattnet. Vattenmolekylerna tillhör en metalljon och är arrangerade i en ordnad gruppering runt metalljonen. Ett exempel härpå är hexakvamagnesiumjonen $(\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6)^{2+}$, som är en byggnadssten i t ex magnesiumkloridkristallen, $(\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6)\text{Cl}_2$.

Kristallvattnet kan emellertid även vara bundet med svagare krafter. Detta vatten avgår från materialet, varvid dess struktur ändras redan vid måttlig temperaturhöjning och det kommer därför att tillhöra det förångningsbara vattnet. Enligt Rebinders indelning kan detta vatten anses tillhöra gruppen fysikalisk-kemisk bindning. Vattnet kan härvid vara grupperat kring en metalljon på samma sätt som vid kovalent bindning och vätebindning men på mycket längre avstånd från denna och därmed med svagare krafter. Vattenmolekylerna behöver emellertid inte vara direkt bundna till en jon, men är ändå nödvändiga för uppbyggandet av en viss kristallstruktur. Dessa senare vattenmolekyler fyller ut luckor, som inte är förenliga med en stabil struktur.

Ett kristallhydrat har bestämd vattenhalt, men vatten kan även vara zeolitiskt bundet, varvid vattenhalten kan variera utan att kristallstrukturen bryts ned. Det zeolitiskavattnet, som även diskuterats i avsnittet ovan, ligger ofta mellan skikten i en skiktad struktur eller i öppna kanaler i strukturen (se fig 5). En ändring av antalet vattenmolekyler kan medföra en förändring av kristallgitterdimensionerna (jfr avsnitt 3.1). Zeolitiskt vatten förekommer i aluminiumsilikat av alkali- och alkaliska jordartsmetaller, men även hos hydroxider och hydroxidsalter av tvåvärda metaller (Ca(OH)_2) samt hos lermineralen, som kristalliserar på liknande sätt. Det zeolitiska vattnet räknas till det kemiskt bundna men är bundet med mycket svaga krafter. Fig 7 illustrerar vattnets avgång ur $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ vid successivt ökad temperatur enligt Powers och Brownyard (1948). Man finner alltså här, att en del av det zeolitiska vattnet kommer att höra till det förångningsbara och en del till det icke-förångningsbara under uttorkning vid 105°C .

Kemisk bindning av vatten är speciellt intressant i samband med de cementbundna materialen. Vid fullständig hydratisering binds en vattenmängd, vars vikt är ungefär en fjärdedel av cementets vikt. Enligt Powers (1947) behövs det emellertid en dubbelt så stor vattenmängd tillsammans med cementet för att fullständig hydratisering skall uppnås. Fig 8 enligt Powers (1947) visar den vattenmängd som tas upp av Portlandcement genom kemisorption vid olika relativa fuktigheter. Denna figur samt figur 9 enligt Gause och Tucker (1940) fick Powers att fastslå, att när betong har torkat till en sådan grad att relativa fuktigheten är under 80 % i porerna kan hydratationen anses vara i det närmaste avslutad. Denna gräns motsvarar

enligt Powers ungefär ett tillstånd, då kapillärporerna i cementpastan helt töms på vatten. Wittmann (1968) påstår emellertid med stöd av resultaten i fig 10, att detta allmänt accepterade påstående inte är riktigt. Hydratiseringen fortsätter enligt honom även under 80 % RF. Som framgår av fig 8 var emellertid Powers ursprungligen medveten om detta.

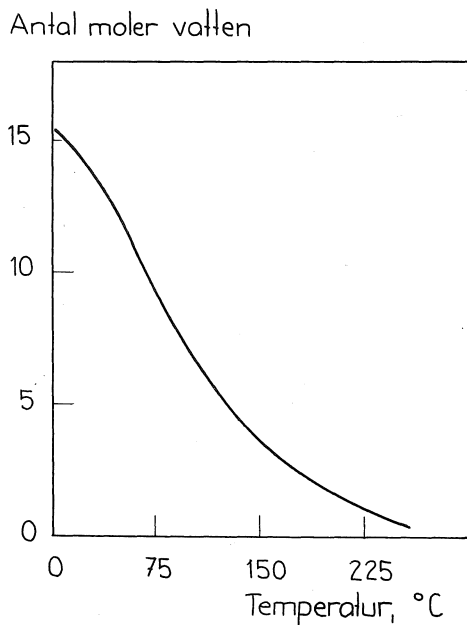


FIG 7 Dehydratisering av zeolitiskt vatten i $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ enligt Powers och Brownyard (1948).

Zeolitic dehydration of $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ according to Powers and Brownyard (1948).

Upptagen vattenmängd, g/g cement

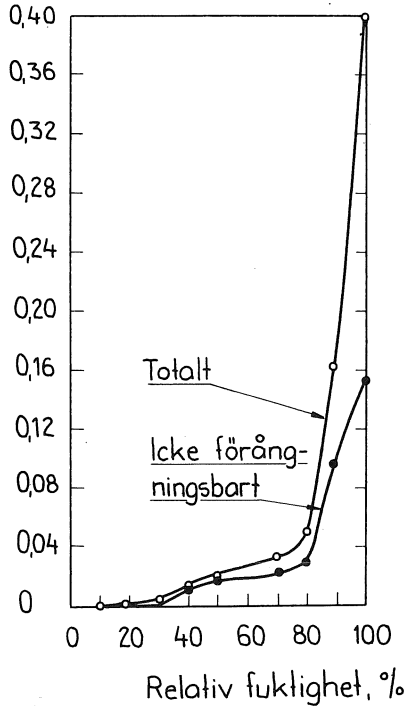


FIG 8 Bindning av vatten till torr Portlandcement i vattenånga under sex månader enligt Powers (1947).

Total and non-evaporable amounts of water taken up by dry cement exposed to water vapour for six months according to Powers (1947).

Relativ fuktighet, %

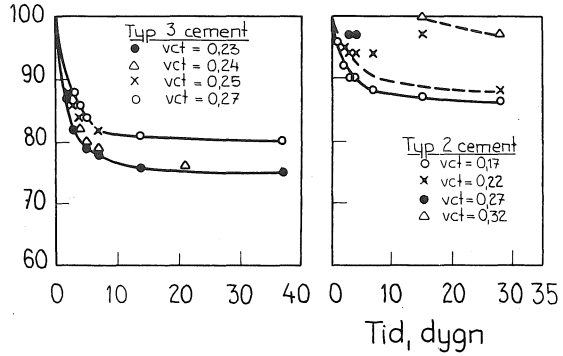


FIG 9 Relativa fuktighetens minskning över förseglad cementpasta enligt Gause och Tucker (1940).

Reduction of relative humidity over sealed pastes according to Gause and Tucker (1940).

Relativ fuktighet, %

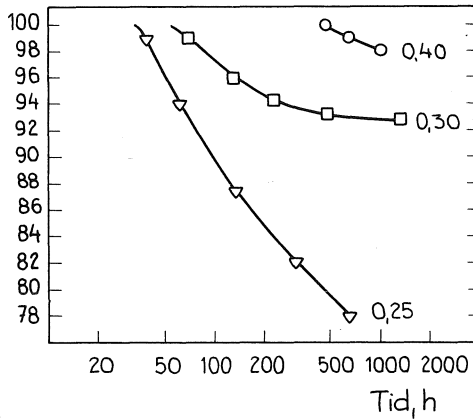


FIG 10 Relativa fuktighetens minskning över förseglad cementpasta med olika vattencementtal enligt Wittmann (1968).

Reduction of relative humidity over sealed pastes with different water/cement ratios according to Wittmann (1968).

3.3 Fysikalisk bindning

3.3.1 Adsorption

De flesta icke-metalliska material innehåller godtyckligt fördelade luftfyllda hålrum. Dessa skopor har mycket varierande utseende och storlek. Porerna, som i mycket stor utsträckning är tillgängliga utifrån, ger materialet en effektiv yta, som vida överstiger den yttre synliga ytan.

Atomerna vid en materialyta befinner sig i ett obalanserat kraftfält. En resulterande kraft verkar på atomerna i ytan. Denna kraft är riktad vinkelrätt mot ytan in i det fasta materialet. Gas- eller ångmolekyler, som finns i porerna och oupphörligen bombarderar porväggarna, binds till materialet av dessa omättnade krafter åtminstone under en viss tidsrymd. Denna bindning av molekyler till materialets ytor kallas fysikalisk adsorption. Den adsorberade gasen kallas adsorbat, och det adsorberande materialet kallas adsorbent.

De krafter som orsakar fysikalisk adsorption är av samma slag som de som är verksamma, då en gas kondenserar till en vätska. Dessa krafter kallas van der Waals-krafter.

Den resulterande kraften på en adsorberad vattenmolekyl kan delas upp på tre olika komponenter. Två av komponenterna utgörs av de krafter, som alltid verkar mellan atomer eller molekyler. Den ena komponenten av dessa är attraktiv till sin natur, medan den andra är repulsiv med kort räckvidd. Den tredje komponenten orsakas av vattenmolekylens permanenta dipolmoment och är starkt attraktiv till sin natur.

Den potentiella bindningsenergin mellan två atomer eller molekyler, som befinner sig på ett avstånd r ifrån varandra ges av

$$U(r) = \frac{b}{r^{12}} - \frac{C}{r^6} \quad (3.1)$$

där b och C är konstanter. Den första termen representerar repulsionskrafterna, som uppstår när molekylerna kommer så nära varandra att en överlappning erhålls av molekylernas elektronmoln. Den andra termen representerar de attraktionskrafter som uppstår, då den snabba ändringen av elektrontätheten i den ena molekylen inducerar ett elektriskt moment i en näraliggande atom eller molekyl.

De ovan nämnda bidragen till bindningsenergin finns mellan alla gaser eller ångor och fasta material. När det gäller vattenånga tillkommer emellertid ett tredje bidrag, beroende på att vattenmolekylen är en permanent dipol. Detta elektrostatiske bidrag till bindningsenergin bestäms av

$$U(\mu) = - F \cdot \mu \cdot \cos\theta \quad (3.2)$$

där μ är dipolmomentet hos vattenmolekylen, F är den elektriska fältstyrkan härrörande från det fasta materialet samt θ är vinkeln mellan riktningen hos dipolmomentet och fältet. Om vattenmolekyler är i närheten av en materialyta kan där finnas ett elektrostatiske fält, beroende på materialet i sig självt, och/eller beroende på att vattenångmolekylen inducerar ett fält. Båda effekterna uppträder samtidigt. Det elektriska fältet är svagt och avtar snabbt med avståndet från materialytan.

För att inverkan av dipolmomentet hos polära molekyler skall ha någon större betydelse vid adsorptionen är det nödvändigt, att den adsorberade molekylen kan komma tillräckligt nära det fasta materialet. Vattenmolekylen har emellertid denna egenskap och adsorberas med starka bindningskrafter till oorganiska salter och oxider.

Bindningskrafterna blir således starka för de vattenångmolekyler som adsorberas direkt på materialytan. Krafterna avtar emellertid snabbt med avståndet från ytan. Redan på ett avstånd av ca två molekylldiametrar från ytan är krafterna som verkar på molekylerna i stort sett inte starkare än i fritt vatten i vätskefas.

Om vattenånga kommer i kontakt med ett material som har negativa ytjoner, (t ex Cl^- eller OH^-) försöker väteatomen att komma i kontakt med dessa för att bilda förhållandevis starka vätebindningar, som alltså även kan förekomma utöver van der Waals-bindningarna. Vätebindningarna är alltså ett resultat av vattenmolekylens dipolmoment. Vid adsorption på KCl ytor har de Boer kunnat bestämma värdet hos $U(\mu)$ till ca 25 kJ/mol, vilket kan jämföras med styrkan hos van der Waals-bindningar som är av storleksordningen 10 kJ/mol.

Vattenångmolekylerna binds till materialytan vid adsorption i monomolekylära skikt. Antalet skikt beror i första hand på relativa fuktigheten i luften som omger materialet. Upp emot hundratalet molekylager kan bindas till materialet. Fig 11 illustrerar den

molekylära bindningen i skikt till materialytorna i en por vid en viss relativ fuktighet. Rounsley (1961) illustrerar den successiva uppbyggnaden av skikten, när relativa fuktigheten ökar i enlighet med fig 12. Trots att bindningskrafterna för det första molekyl-lagret i allmänhet är betydligt större än för de därefter följande, kondenserar ett mindre antal molekyler i de övre lagren även vid mycket låga relativa fuktigheter. Detta beror förmodligen på störningar i kraftfältet på grund av materialens geometriska uppbyggnad.

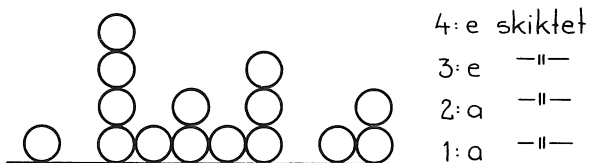


FIG 11 Adsorption av vattenmolekyler i olika skikt kan ske även om de tidigare skikten inte är fyllda.

Adsorption of water molecules in different layers is possible even if earlier layers are not filled.

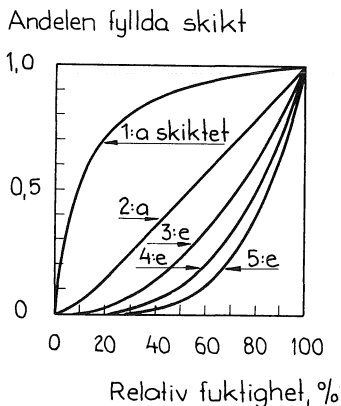


FIG 12 Relativa uppbyggnaden av adsorberade skikt enligt Rounsley (1961).

The relative build-up of individual layers according to Rounsley (1961).

Betrakta en plan gränssyta mellan vattenånga som adsorbat och ett fast material som adsorbent. Den adsorberade vattenångan är i jämvikt med den icke-adsorberade vattenångan, som omger materialet. Ändringen av inre energi (E) hos en ytfas (volym V och yta A) bestående av de två komponenterna adsorbat och adsorbent bestäms av

$$dE = TdS - PdV + \gamma dA + \mu_m dn_m + \mu_a dn_a \quad (3.3)$$

där T = absoluta temperaturen

S = entropin

P = trycket i ytfasen

γ = ytspänningen

μ_m, μ_a = kemiska potentialerna hos resp material och adsorberat vatten

n_m = antalet molekyler hos materialet i ytfasen

n_a = antalet adsorberade molekyler vatten

Härav följer Gibbs-Duhems samband:

$$0 = SdT - VdP + Ad\gamma + n_m d\mu_m + n_a d\mu_a \quad (3.4)$$

samt

$$E = TS - PV + \gamma A + \mu_m n_m + \mu_a n_a \quad (3.5)$$

Gibbs fria energi kan definieras som

$$G = E - TS + PV - \gamma A \quad (3.6)$$

Man kan med säkerhet anse att mängden fast material i den tänkta ytfasen inte ändras, och om man bortser från denna fås

$$G = \mu_a n_a \quad (3.7)$$

och

$$dG = \mu_a dn_a + n_a d\mu_a \quad (3.8)$$

Vid jämvikt är antalet adsorberade molekyler konstant, $dn_a = 0$. Ekvation (3.4) och (3.8) ger då

$$dG = -SdT + VdP - Ad\gamma = n_a d\mu_a \quad (3.9)$$

Vid jämvikt mellan den adsorberade fasen och den omgivande vattenångan gäller vidare om vattenångan anses vara en ideal gas att

$$\mu_a = \mu_v(p, T) = \mu_v(T) + RT \ln p \quad (3.10)$$

där μ_v = vattenångans kemiska potential.

Vid konstant tryck fås

$$dG = -SdT - A d\gamma = n_a (d\mu_v' + R \ln p dT) \quad (3.11)$$

$$\frac{dG}{dT} = -S - A \frac{d\gamma}{dT} = n_a \left(\frac{d\mu_v'}{dT} + R \ln p \right) \quad (3.12)$$

Vid konstant temperatur fås

$$dG = V dP - A d\gamma = n_a \cdot RT \cdot d(\ln p) \quad (3.13)$$

$$\text{och om } n_a = \frac{x}{M} \quad (3.14)$$

där x = antalet kg adsorbat per kg adsorbent, fuktkvoten

M = molekylvikten

fås

$$\Delta G = \frac{RT}{M} \int x \cdot d(\ln p) \quad (3.15)$$

vilken är Gibbs adsorptionsekvation. Den adsorberade mängden vatten skall inte försummas, vilket man ibland gör.

I fritt vatten är krafterna per ytenhet lika i alla riktningar, vilket inte är fallet i ytfasen. Det effektiva trycket varierar med avståndet från ytan. De adsorberade vattenångmolekylerna är utsatta för ett tryck vinkelrätt mot materialytan.

Vid 60 % RF är övertrycket 695 atm, då en mol adsorberats och vid 10 % RF ca 4000 atm.

Powers (1968) och senare bl a Bažant (1972) anser att i fina porer, där tillräcklig plats inte finns för adsorption av det antal molekylskikt som motsvarar relativa fuktigheten i materialet, är trycket hos vattnet större än vid icke hindrad adsorption. Detta s k "disjoining pressure" har enligt Powers stor betydelse vid krympning och krypning.

Samtidigt som ett tryck verkar vinkelrätt mot materialytan, finns ett tvådimensionellt tryck tangentiellt i ytans plan, vilket verkar på det adsorberade vattnet. Detta s k yttryck, π är betydligt mindre än trycket vinkelrätt mot ytan och bestäms av

$$\pi = \gamma_w - \gamma \quad (3.16)$$

där γ_w = ytspänningen för fritt vatten.

Vid en isoterm adsorptionsprocess utgörs adsorptionsvärmets av den värme som avges till omgivningen under adsorptionen. Differentiella adsorptionsvärmets, q_d bestäms av

$$q_d = \frac{dQ}{dn_a} \quad (3.17)$$

där dQ är den värmemängd som avges till omgivningen, då dn_a moler adsorberas.

Då

$$dQ = -dE - pdV \quad (3.18)$$

gäller

$$q_d = \frac{E_v}{n_v} - \frac{\partial E_a}{\partial n_a} \quad (3.19)$$

där $\frac{E_v}{n_v}$ = inre energin per mol hos den icke adsorberade vattenångan

E_a = inre energin hos det adsorberade vattnet.

Om den isoterma processen även är isobar, brukar det differentiella adsorptionsvärmets benämnas det isostera adsorptionsvärmets, q_{st} . Om vattenångan anses vara en ideal gas fås att

$$q_{st} = RT^2 \left(\frac{\partial}{\partial T} \ln p \right) \quad (3.20)$$

Sambandet mellan q_d och q_{st} är

$$q_d = q_{st} - RT \quad (3.21)$$

Vid en minskning av temperaturen erhålls en minskning av fria energin hos det adsorberade vattnet. Effekten av ändrad temperaturnivå erhålls ur ekvation (3.11):

$$A \frac{dy}{dT} = -S - \frac{dG}{dT} = -S - n_a \left(\frac{d\mu'_v}{dT} + R \ln p \right) \quad (3.22)$$

där $S = \int C_p d(\ln T)$

C_p = specifika värmets vid konstant tryck

En minskning av temperaturen orsakar en ökning av ytspänningen hos den adsorberade vattenfilmen samt en sänkning av vattenångans partialtryck i den omgivande luften, som är i jämvikt med materialet, om fuktkvoten är konstant. Intressantare är dock, att då temperaturen sänks och partialtrycket är konstant, kommer fuktkvoten

att öka för att jämvikt skall råda med den omgivande luften. Jämviktsfuktkvoten för ett material ökar alltså vid sänkt temperaturnivå.

3.3.2 Kapillärkondensation

Efter hand som flera molekyllära skikt av vatten binds till materialet då relativa fuktigheten ökar, kommer så småningom vad man kan karakterisera som rena vätskeytor att bildas. Flera bl a Powers (1968) och Broekhoff (1969) har hävdad, att då ett par tre molekyllager adsorberats, har det adsorberade vattnet i stort sett samma egenskaper som vatten i vätskefas. I fina porer och andra trånga utrymmen kommer därför krökta vätskeytor att bildas efter hand (se fig 13). Enligt kapillärkondensationsteorin, som ursprungligen framlagts av Zsigmondy, kommer vattenånga att kondensera vid dessa krökta vätskeytor. Beroende på framför allt vätskeytans krökning kommer kondensation att ske vid partialtryck hos vattenångan, som är lägre än mättnadstrycket.

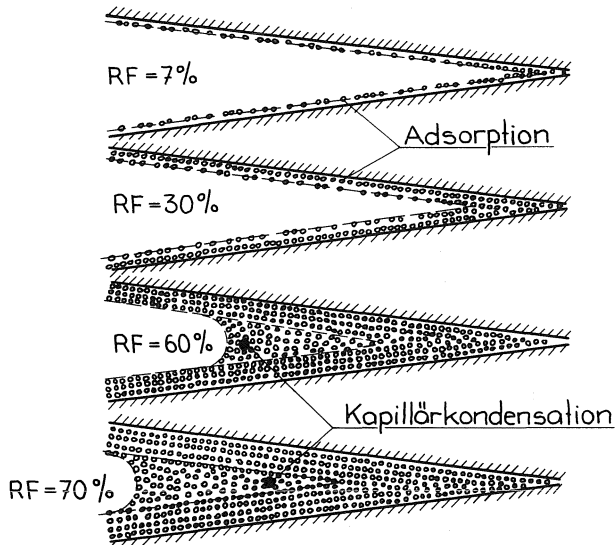


FIG 13 Gradvis uppfyllning av en por genom adsorption och kapillärkondensation.
Gradual filling of a pore through adsorption and capillary condensation.

Zsigmondy (1911) ansåg att kapillärkondensation utgjorde orsak till absorptionen över huvud taget. Han hävdade därför även, att kapillärkondensation ägde rum i porer med samma dimensioner som vattenångmolekylen. Allmänt är man emellertid numera överens om, att kapillärkondensation spelar någon roll först då porradierna blir några vattenmolekyldiametrar stora samt då relativa fuktigheten har nått någorlunda storlek. Sålunda anser bl a Dubinin et al (1966), att kapillärkondensation har betydelse för porer i ett s k "mellanliggande" område med radie mellan 15 och 1000Å. Lykow (1958) sätter emellertid den undre gränsen så lågt som vid 5Å för porradien. Powers (1968) och Harmathy (1967) anser vidare, att adsorption till följd av kapillärkondensation får betydelse vid relativa fuktigheter över 40-45 %. Everett (1958) väljer emellertid att sätta gränsen vid ca 25 % RF eller vid porradier på ca 12Å.

Som nämnts ovan är vattenångtrycket över en konkav vattenyta lägre än över en plan yta vid ett tillstånd av jämvikt. Detta beror på att en skillnad i tryck råder mellan vätskan och vattenångfasen till följd av vattnets ytspänning (se fig 14). Det inre trycket i vätskan är lägre än trycket i ångfasen. Tryckskillnaden ges av den ekvation, som ställts upp av Young och Laplace:

$$\Delta P = \gamma_w \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = P_w - p \quad (3.23)$$

där ρ_1 och ρ_2 = huvudradierna hos den krökta vätskeytan
P = vattnets tryck
p = vattenångans partialtryck
 γ_w = ytspänningen för fritt vatten

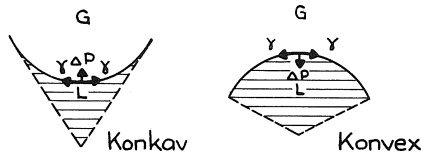


FIG 14 Krafter vid krökta vätskeytor.
Forces at curved liquid surfaces.

Radierna ρ_1 och ρ_2 är negativa för en konkav vätskeyta. ΔP är således en negativ storhet och representerar den hydrostatiska dragspänning, under vilken vattnet i en por eller kapillär befinner sig.

Kemiska potentialen för en vätska, som skiljs från sin ångfas med en krökt vätskeyta (μ_w), avviker från dess värde vid plan vätskeyta (μ_{w0}) med

$$\mu_w = \mu_{w0} + \int_{p_s}^p V_w dp \quad (3.24)$$

där p_s = vattenångans mättnadstryck
 V_w = specifika volymen för vatten

Om specifika volymen anses oberoende av trycket, eller med andra ord vattnets kompressibilitet försummas, erhålls

$$\mu_w = \mu_{w0} + V_w(p - p_s) = \mu_{w0} + \gamma_w V_w \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) + V_w(p - p_s) \quad (3.25)$$

Vid ett jämviktstillstånd mellan vattenytan och vattenångan däröver gäller

$$\mu_w = \mu_v \quad (3.26)$$

där μ_v = kemiska potentialen hos vattenångfasen

Vidare gäller för en ånga som vattenånga att

$$\mu_v - \mu_{v0} = RT \ln \frac{p}{p_s} \quad (3.27)$$

där R = gaskonstanten för vattenånga

T = absoluta temperaturen

Då fås att

$$RT \ln \frac{p}{p_s} = \gamma_w V_w \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) + V_w(p - p_s) \quad (3.28)$$

För vatten kan här den sista termen, $V_w(p - p_s)$ försummas. Vid höga relativa fuktigheter och vid normala temperaturer är termen $RT \ln \frac{p}{p_s} \cdot 10^4 - 10^5$ gånger så stor som denna.

Återstår gör därför endast

$$\ln \frac{p}{p_s} = \frac{\gamma_w \cdot V_w}{RT} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (3.29)$$

vilken är känd som Kelvin-ekvationen.

Den kapillära dragspänningen hos vattnet i materialet bestäms alltså av omgivningens relativa fuktighet och temperatur

$$\Delta P = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{p}{p_s} \quad (3.30)$$

Vid ett jämviktstillstånd mellan ett material och den omgivande luften har alltså alla menisker i materialet samma krökningsradie.

Bildandet av en krökt vätskeyta och dess krökningsradier är beroende av olika faktorer. Kurvaturen bestäms i hög grad av materialets porgeometri, storlek och utseendet hos utrymmen i ett material, där krökta vätskeytor kan bildas. Betydelse har även kontaktvinkeln mellan vattnet och materialet. Den krökta vätskeytans närhet till det fasta materialet spelar härvid en stor roll. Antalet adsorberade molekyllager eller relativa fuktigheten hos omgivningen är av betydelse.

Randvinkeln eller kontaktvinkeln, θ illustreras i fig 15. Om man betraktar en cirkulär por med radie r , gäller följande samband mellan porradie och krökningsradie.

$$r = -\rho \cos \theta \quad (3.31)$$

Vid fullständig vätning ($\cos \theta = 1$) är alltså meniskens radie lika med krökningsradien.



FIG 15 Randvinkeln, θ vid en vätska i kontakt med ett material.
Angle of contact, θ between a liquid and a solid material.

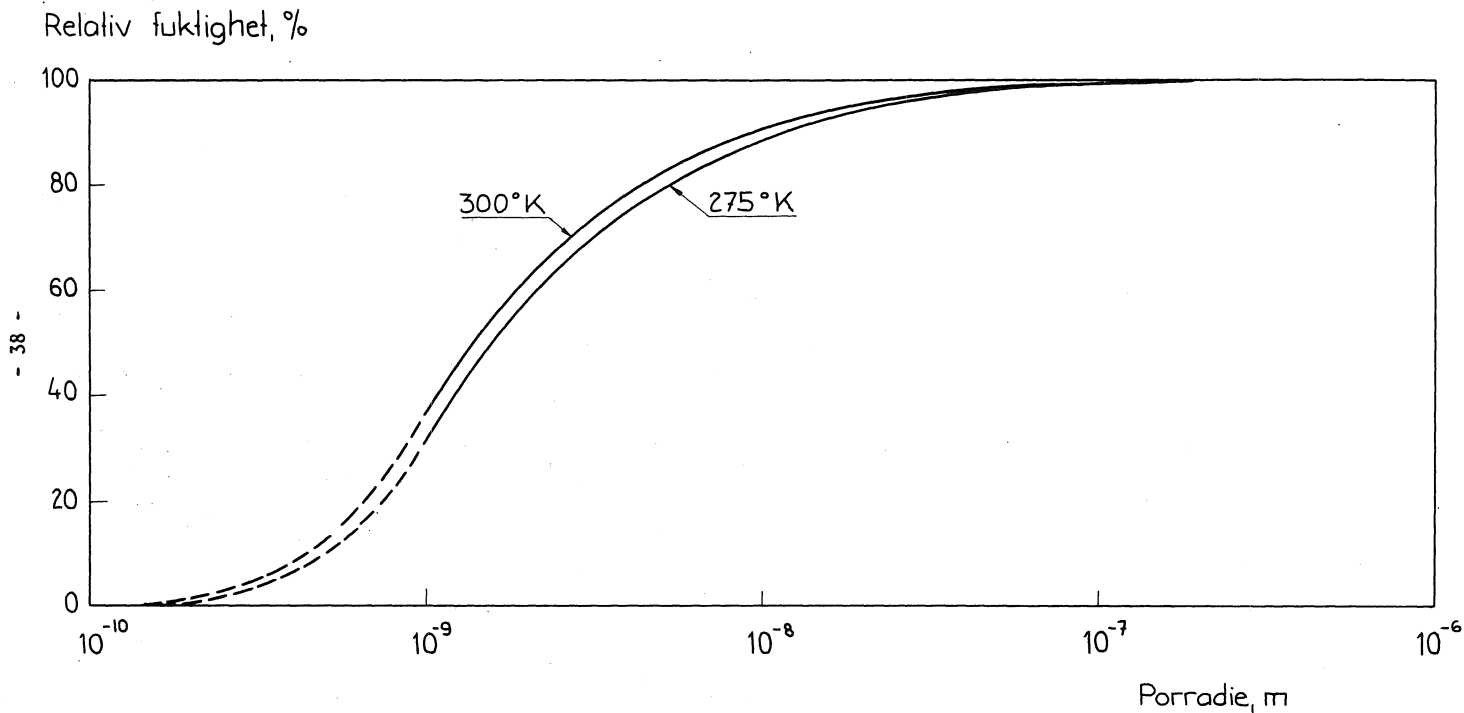


FIG 16 Relativa fuktighetens variation med porradien enligt Kelvin-ekvationen. Vos och Tammes (1969).

Relative humidity as a function of pore radius according to Kelvin equation. Vos and Tammes (1969).

För porer med cirkulär genomskärningsyta och vid fullständig vätning erhålls följande samband mellan omgivningens relativa fuktighet och radien hos de porer, som härvid är fyllda med vatten vid ett jämviktstillstånd

$$\ln \frac{p}{p_s} = - \frac{\gamma_w V_w 2}{RT r} \quad (3.32)$$

Fig 16 illustrerar detta samband vid temperaturerna 275 och 300°K.

3.3.3 Osmotisk bindning

Byggnadsmaterialen innehåller i de flesta fall flera olika salter. De cementbundna materialen innehåller t ex $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH och KOH , medan de keramiska materialen kan innehålla Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaCO_3 , CaSO_4 , MgSO_4 och NaCl . Flera av dessa salter är lösliga i vatten och har därför betydelse för bindningen av vatten till materialet.

De lösta salterna ger på samma sätt som de ovan beskrivna yt- och kapilläreffekterna upphov till en reduktion av ångtrycket i materialet. Enligt Lykow (1966) är relativa reduktionen i ångtrycket över en lösning beroende av andelen moler av den lösta substansen (v_{10}):

$$\frac{p_s - p}{p_s} = v_{10} = 1 - v_{00} \quad (3.33)$$

där v_{00} = andelen moler vatten i lösningen

Således är $\phi = \frac{p}{p_s} = v_{00}$. Relativa fuktigheten över rent vatten är alltså 100 %. Över en mättad saltlösning erhålls en viss konstant relativ fuktighet, som är beroende av saltets löslighet i vatten. Vid en högre relativ fuktighet hos den omgivande luften binder saltlösningen ytterligare vatten och blir utspädd, om den var precis mättad. Så länge som saltlösningen är mättad eller övermättad är emellertid relativafuktigheten konstant över dess yta. Lösningen tar härvid upp vatten från den omgivande luften, ända tills ett jämviktstillstånd har erhållits mellan luftens relativa fuktighet och lösningens koncentration.

Många av de salter som förekommer i materialen är relativt svår-lösliga. Dessa har därför liten betydelse i det område som är intressant här, säg mellan 0 och 98 % RF. Ett flertal salter förekommer emellertid i byggnadsmaterialen, som i mättad lösning ger relativa fuktigheter över sin yta i området 0 till 98 %. Dessa salter brukar kallas hygroskopiska. De flesta lösliga salterna förekommer emellertid i materialen i små mängder.

Powers och Brownyard (1948) har studerat den andel vatten som binds till en cementpasta till följd av lösta salter. De salter som är av betydelse är NaOH och KOH. Den studerade cementpastan innehöll 0,004 g löslig alkali (NaOH) per g cement.

Fig 17 visar absorberad vattenmängd vid olika relativa fuktigheter, dels för enbart NaOH och dels för cementpastan.

Vattenmängd, g/g cement el. NaOH

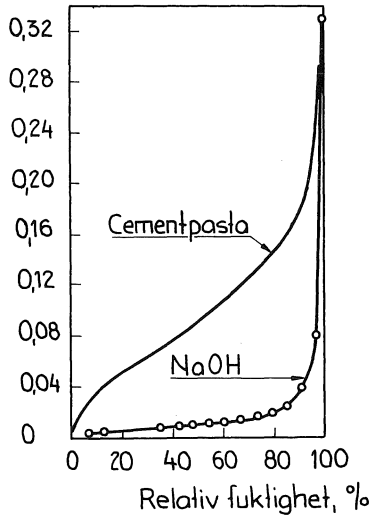


FIG 17 Absorberad vattenmängd i cementpasta med löslig alkali och i enbart NaOH enligt Powers och Brownyard (1948).

Amount of absorbed water in cement paste with dissolved alkali and in NaOH according to Powers and Brownyard (1948).

Powers och Brownyard konstaterar att vid relativa fuktigheter under ca 80 %, kan endast en mindre del av det absorberade vattnet vara osmotiskt bundet. I området däröver är emellertid effekten större. Trots detta försummar man i det fortsatta resonemanget inverkan av osmotisk bindning och hänför absorptionen av vatten till adsorption och kapillärkondensation, vilket kan tyckas vara något tveksamt.

Relativt litet är tyvärr känt om inverkan av lösta salter. Lykow (1966) och Bomberg (1971) anser att osmotisk bindning spelar underordnad roll i det s k hygroskopiska området, men att inverkan är större i det omedelbart ovanför liggande området, då vatten kan ha tillförts materialet genom kapillär uppsugning.

Vos (1969) hävdar att osmotisk bindning kan ha stor betydelse, om salter har tillförts materialet utifrån. Som exempel härpå ger han material, som kommit i kontakt med havsvatten och därigenom tillförts stora mängder NaCl.

4 ISOTERMEN

4.1 Allmänt

Material, som befinner sig i luft med en viss relativ fuktighet och temperatur, intar efter en tid ett tillstånd av jämvikt med den omgivande luften. Vattenångans partialtryck och temperaturen i materialets porer är härvid densamma som i den omgivande luften. Som redogjorts för i kapitel 3 binds vatten till materialet, och i ett homogent material är fuktkvoten densamma i varje punkt. Kemisk bindning av luftfuktighet kan förekomma i samband med vissa material (se kapitel 3.2). Intressanti detta sammanhang är emellertid endast det vatten, som binds vid en reversibel process och som kan räknas tillhöra det förångningsbara vattnet.

Den mängd förångningsbart vatten som vid jämvikt binds till ett material är beroende av luftens relativa fuktighet och temperatur, samt av det sätt på vilket jämviktstillståndet har nåtts. Sambandet mellan jämviktsfuktkvot och relativ fuktighet vid konstant temperatur kallas sorptionsisoterm eller bara isoterm. Ett stort antal isotermer har genom åren bestämts för olika ångor och gaser, som är absorberade av olika material. Brunauer, Emmet och Teller (1938) har grupperat isotermerna i fem klasser, vilka framgår av fig 18.

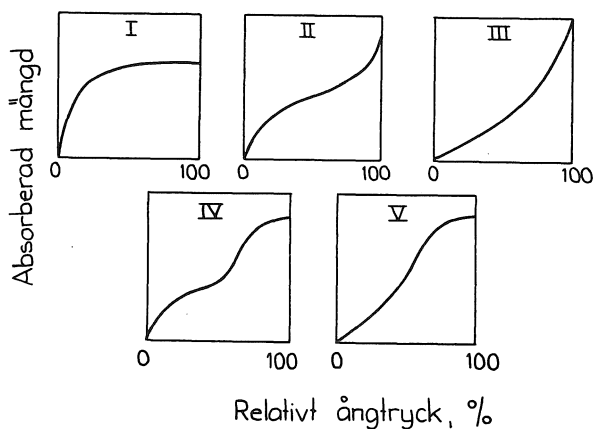


FIG 18 Olika isotermtyper enligt Brunauer, Emmett och Teller (1938).

Different types of isotherms according to Brunauer, Emmett and Teller (1938).

Isotermtyperna I och II är de vanligaste förekommande. Kurva I är typisk för gaser över den kritiska temperaturen. Asymptoten till denna kurva motsvarar vanligtvis ett monomolekylärt skikt, som täcker adsorbentens yta. Bindningen av gasen till det fasta materialet sker alltså endast genom adsorption. För ångor (gaser under kritiska temperaturen) är den S-formade isotermer II den vanligaste. Vid uppbyggnaden av denna isotermtyp är samtliga de ovan i kapitel 3 beskrivna bindningsmekanismerna verksamma. De olika bindningsformerna har med ökande tryck hos adsorbentet betydelse för isoterms utseende i följande ordning: monomolekylär adsorption, polymolekylär adsorption, kapillärkondensation och för vissa adsorbenter har även osmotisk bindning betydelse vid höga tryck.

Isotermer av typ III erhålls för material, där gasen eller ångan binds framför allt genom kapillärkondensation men i vissa fall även genom osmos. Typerna IV och V är helt analoga med II och III men är mättade med adsorbent vid tryck som är under mättnadstrycket.

Fixering av vattenånga vid porösa byggnadsmaterial ger isotermer av typ II. Isotermer, som har ett utseende med dragning åt typ III, förekommer för material med liten specifik yta och därmed liten adsorberad vattenmängd vid låga relativa fuktigheter.

Vid låga relativa fuktigheter (området $\phi < \phi_1$, i fig 19) adsorberas vattnet nästan uteslutande i ett monomolekylärt skikt. I området $\phi_1 < \phi < \phi_2$ sker fuktfixeringen i flera skikt. Denna adsorption i flera skikt fortsätter även vid relativa fuktigheter över ϕ_2 , men betydelsen av adsorptionen avtar efter hand. Isoterms nedre del bestäms alltså av materialets specifika yta. Vid ϕ_2 börjar bindning av vatten genom kapillärkondensation. Var kapillärkondensationen börjar är emellertid osäkert (se kapitel 3.3.2). Förutsatt att materialet innehåller porer med en radie på 12-15 Å, börjar kapillärkondensationen vid relativa fuktigheter på ca 40 %. Då relativa fuktigheten ökar, fylls efter hand allt grövre porer med vatten, Den absorberade vattenmängden ökar starkt, och isotermer är konvex mot relativa fuktighets-axeln. En del material saknar i stort sett fina porer, och kapillärkondensationen får betydelse först vid högre relativa fuktigheter. Isoterms övre del bestäms alltså i huvudsak av materialets porstorleksfördelning. Vid relativa fuktigheter över ϕ_3 kan för vissa material även osmotisk bindning få betydelse. ϕ_3 bör ligga någonstans i området 80-90 % RF, men osäkerhet råder.

Fuktkvot

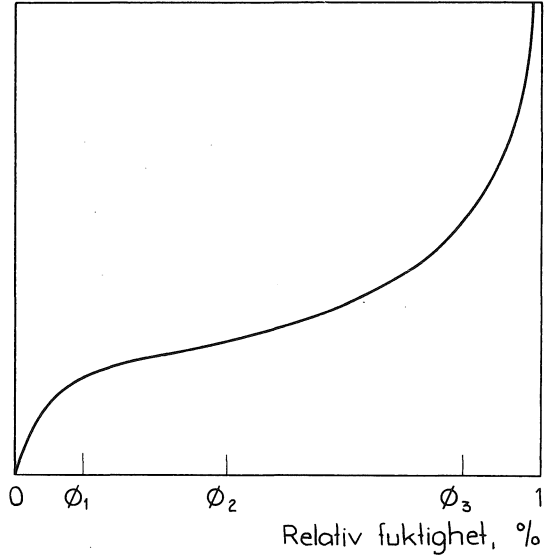


FIG 19 Fuktfixeringsmekanismernas verksamhetsområden:
Fields of action for the mechanisms of moisture fixation:

- $\phi < \phi_1$ monomolekylär adsorption;
monomolecular adsorption.
- $\phi > \phi_1$ polymolekylär adsorption;
polymolecular adsorption.
- $\phi > \phi_2$ kapillärkondensation;
capillary condensation.
- $\phi > \phi_3$ eventuell osmotisk bindning;
possibly osmotic binding.

Då relativa fuktigheten går mot 100 %, närmar sig isotermen asymptotiskt den fuktkvot, som motsvarar fullständig fyllning med vatten av det utifrån tillgängliga porsystemet. Rent teoretiskt är alltså varje material mättat med vatten vid jämvikt med 100 % RF. Den branta lutningen på isotermen och den därmed stora osäkerheten hos jämviktsfuktkvoterna vid relativa fuktigheter i närheten av 100 % har gjort att man (se t ex Adamson et al (1969) och Vos (1969)) begränsar isotermen till området under 98 % RF. Vidare är det praktiskt mycket svårt att hålla relativa fuktigheten på

ett konstant värde över 98 %, varför jämviktsfuktkvoterna blir svårbestämda. Detta område kallas det hygroskopiska området, och det vatten som är bundet till ett material vid jämvikt med relativa fuktigheter under 98 % kallas hygroskopisk fukt. Kapillärkondensation vid 98 % RF ger enligt Kelvins ekvation (se kap 3.3.2) att porer med en radie på ca 500 Å är fyllda med vatten. I det hygroskopiska området fylls alltså porer, som enligt Dubinin et al (1966) räknas till mikroporerna och de "mellanliggande" porerna. Makroporerna innehåller fortfarande huvudsakligen luft så när som på några adsorberade molekylskikt på porväggarna.

4.2 Absorption och desorption

4.2.1 Allmänt

Utöver relativ fuktighet och temperatur hos den omgivande luften har även det sätt på vilket jämviktstillståndet nåtts betydelse för ett materials jämviktsfuktkvot. Om jämvikt nås under torkning erhålls en desorptionsisoterm, och om jämvikt nås under uppfuktning erhålls en absorptionsisoterm. Två ytterlighetskurvor (se fig 20) erhålls beroende på om materialet är helt torrt eller har ett fukttinnehåll över det hygroskopiska området i utgångsläget. Om man betraktar dessa båda ytterlighetskurvor, ligger desorptionsisotermen alltid över absorptionsisotermen vid samma temperatur. Olika jämviktstillstånd mellan dessa båda yttre kurvor kan nås, antingen genom avbruten absorption följt av desorption enligt ABC i fig 21 eller genom avbruten desorption följt av absorption enligt DEF. Dessa s k "scanning-curves" behandlas ytterligare nedan.

Existensen av skilda kurvor vid absorption och desorption (s k hysteresis) ifrågasätts inte idag. Teorier har framlagts där man hävdar, att de observerade jämviktstillstånden inte utgör slutstillstånd beroende på processens låga hastighet, varför något hysteresis-fenomen inte skulle föreligga. Denna hypotes har man emellertid förkastat som felaktig.

Fuktkvot

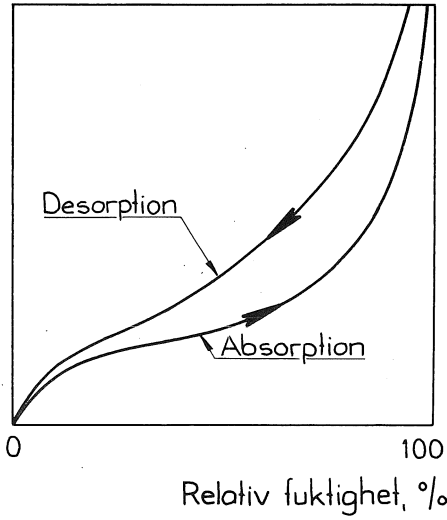


FIG 20 Absorptions- och desorptionsisotermer.
Absorption and desorption isotherms.

Fuktkvot

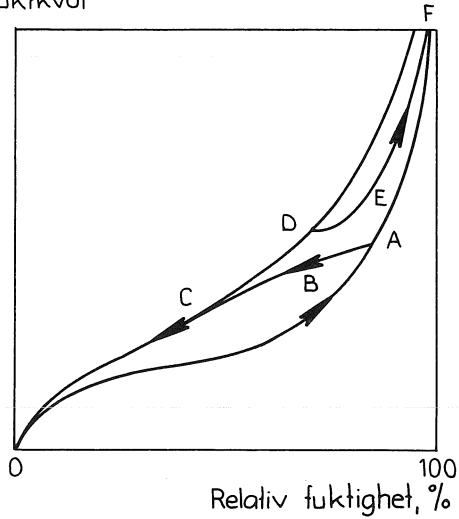


FIG 21 Exempel på "scanning-curves".
Examples of "scanning-curves".

Studerar man litteraturen över bestämningar av isotermer för olika adsorbat och adsorbenter, finner man att desorptionsisotermer förekommer mycket sparsamt. Framför allt gäller detta isotermer av typ II (se fig 18), som ju är intressanta i samband med byggnadsmaterial. Då det gäller andra adsorbat än vattenånga, framför all de som befinner sig i ett gästillsstånd, beror denna brist på försökstekniska svårigheter. Problem bör föreligga med att fylla materialet med så mycket adsorbat, att den verkliga högst liggande desorptionsisotermen erhålls. Detta problem bör emellertid inte föreligga beträffande isotermer för byggnadsmaterial med vattenånga som adsorbat. Trots detta saknas helt systematiska bestämningar av både absorptions- och desorptionsisotermer för samma material. I de flesta referenser förekommer endast absorptionsisotermen, och i många fall har man inte angett om kurvorna gäller absorption eller desorption.

De av Johansson och Persson (1944) bestämda isotermerna, som har fått stor spridning i den byggnadstekniska litteraturen, avser endast absorption. Ur kapitel 5 framgår det emellertid att skillnader på över 100 % mellan absorption och desorption erhålls för vissa byggnadsmaterial med relativa fuktigheter mellan 80-98 %. Tveit (1966) har bestämt ett stort antal isotermer vid olika temperaturer. Jämviktsfuktkvoterna vid högre relativa fuktigheter är bestämda under absorption, medan jämviktsfuktkvoterna vid lägre relativa fuktigheter är bestämda under desorption. Dessa jämviktsfuktkvoter är sammanbundna till en isotherm. Eftersom hysteresisen är måttlig vid låga relativa fuktigheter, motsvarar kurvorna närmast absorptionsisotermer. I samband med flera praktiska behov, då kravet på noggrannhet inte är stort och i samband med vissa material med liten hysteresis klarar man sig med enbart absorptionsisotermen. Emellertid har många byggnadsmaterial hög fuktkvot av byggfukt under byggskedet och når så småningom sitt jämviktstillstånd under desorption. Hysteresisen är även i många fall betydande, varför bedömningar med utgångspunkt från absorptionskurvan kan ge helt missvisande resultat.

4.2.2 Orsaker till hysteresis

Eftersom olika mekanismer i huvudsak är verksamma i olika avsnitt vid isotermens uppbyggnad, finns även olika förklaringar till hysteresisen vid olika relativa fuktigheter. I området upp till ca 40 % RF är variationer i adsorptionsprocessen orsak till hysteresisen, medan kapillärkondensationsprocessen är avgörande vid relativa fuktigheter däröver.

Sann adsorption är emellertid inte föremål för hysteresis. Detta betyder att vid adsorption av en ren gas eller ånga, är den bundna mängden oberoende av om jämvikt nås under ökande eller avtagande tryck. Närvaro av luft eller andra orenheter ger emellertid upphov till hysteresis vid låga tryck. Vid de isotermbestämningar, då ingen hysteresis erhålls, utföres mätningarna i vakuumsystem, så att tryckförhållandena kontrolleras exakt, och så att luft och andra orenheter kan avlägsnas före mätningarna. Effektiv avgasning utförs även genom att samtidigt värma adsorbenten.

Fixering av vattenånga vid porösa byggnadsmaterial sker under naturliga förhållanden i närvaro av luft. Viss hysteresis förekommer därför i detta fall vid låga relativa fuktigheter. Denna hysteresis är emellertid ringa beroende på vattenmolekylernas starka bindningskrafter (se kapitel 3.3.1), jämfört med bindningskrafterna hos de i luften förekommande övriga molekylerna. Vid adsorption upptas alltså en del av materialets yta av främmande molekyler, som resulterar i en mindre mängd absorberad vattenånga än vid desorption. Hysteresis vid låga relativa fuktigheter kan även bero på en irreversibel växelverkan mellan vattnet och materialets struktur. Fenomenet uppträder enligt Feldman och Sereda (1968) ofta, när materialet uppvisar en skiktad struktur och förändringar i avståndet mellan dessa skikt har observerats. Sådana material är cementpasta och lermineraler (se kapitel 3.1).

I området över ca 40 % RF är kapillärkondensationsmekanismen ansvarig för hysteresisfenomenen. I stort sett tre i princip olika förklaringar har framförts. Bl a Zsigmondy (1911) ansåg hysteresisen bero på varierande vätning och därmed ändrad randvinkel $\pm \theta$ till följd av närvaro av främmande gaser vid adsorption. Kraemer (1931) och McBain (1935) företrädde en annan teori, den så kallade "ink-bottle"-teorin. Den tredje förklaringen som framförts av Cohan (1938 och 1944) kallas "open-pore"-teorin, som i sig inrymmer "ink-bottle"-teorin.

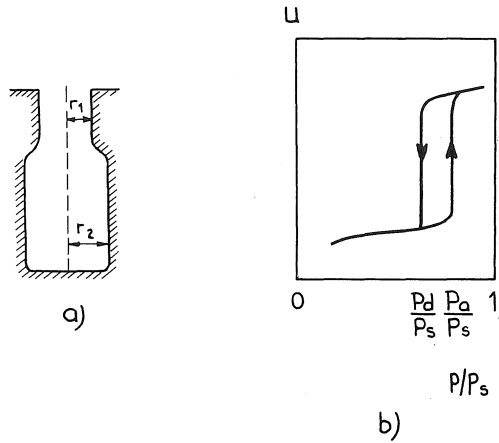


FIG 22 "Ink-bottle"-por (a) och dess kapillärkondensationsisotermer (b) enligt Kraemer (1931).

"Ink-bottle"-pore (a) and its isotherms of capillary condensation (b) according to Kraemer (1931).

Zsigmondy förklarade hysteresisen med att kontaktvinkeln θ är större än noll vid absorption, med vinkeln är lika med noll vid desorption. Insättning i Kelvin-ekvationen (kap 3.3.2) ger därför, att en por med viss radie fylls vid en högre relativ fuktighet under absorption än under desorption. Rao (1941) har emellertid visat att hysteresis förekommer även då luft inte är närvarande. Trots att hysteresis inte kan förklaras med varierande vätningsförhållanden, kan dock viss inverkan vara möjlig till följd av varierande randvinkel, och Zsigmondys teori kan inte helt förkastas.

Vid "ink-bottle"-teorin antas orsaken till hysteresis vara att materialets porer har en trång öppning med radie r_1 och ett vidare hålrum med radie r_2 (se fig 22a). Vid absorption kommer poren att fyllas först då relativa fuktigheten nått

$$\frac{p_a}{p_s} = \exp\left(-\frac{2\gamma_w V_w}{r_2 RT}\right) \quad (4.1)$$

som erhålls genom insättning i Kelvin-ekvationen (3.2.9). Vid desorption är hela poren fylld med vatten ända till dess att relativa fuktigheten sjunkit till

$$\frac{p_d}{p_s} = \exp\left(-\frac{2\gamma_w V_w}{r_1 RT}\right) \quad (4.2)$$

Hela den vida poren töms alltså först, då menisken vid den smala öppningen brister.

Ett tänkt material som endast har en sorts porer, som i figur 22a, uppvisar absorptions- och desorptionsisotermer i enlighet med fig 22b. Eventuell hysteresis vid låga relativa fuktigheter har här försummats.

Om porerna inte har någon avsmalnande hals, utan ser ut som i fig 23b, erhålls inte någon hysteresis. De båda isotermerna sammanfaller (se fig 23b).

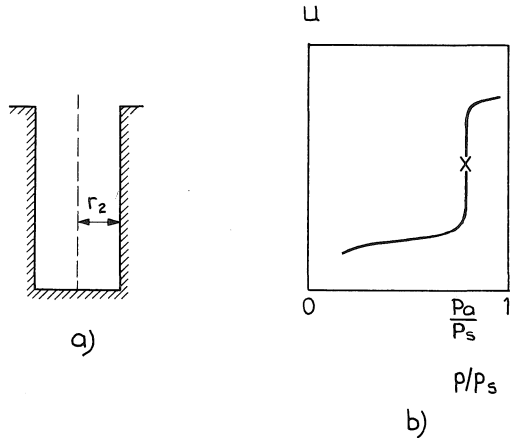


FIG 23 Por utan avsmalnande hals (a) och dess isotermer (b).
Pore without narrow neck (a) and its isotherms (b).

Cohans teori om hysteresis bygger på att kapillärens yta är täckt med ett adsorberat skikt med tjockleken = t när kapillärkondensationen blir verksam. Som framgår av fig 24a har då radien hos en cirkulär kapillär minskat från r till $(r-t)$. För den cylindriska ytan, som härvid erhålls, är krökningsradien $\rho_1 = -(r-t)$ och $\rho_2 = \infty$ (se kapitel 3.3.2). Med dessa värden insatta i ekvation (3.2.9) erhålls

$$\ln \frac{p_a}{p_s} = - \frac{\gamma_w \cdot V_w}{RT} \cdot \frac{1}{r-t} \quad (4.3)$$

p_a är således det ångtryck vid vilket kapillärkondensationen börjar, och även det ångtryck vid vilket kapillären helt fylls med vatten.

När kapillären är helt fylld med vatten, bildas en sfärisk menisk vid dess mynning (se fig 24b). Om randvinkeln $\theta=0$ gäller för denna menisk att $\rho_1=\rho_2=r$. Kapillären kommer därför att helt tömmas på vatten när vattenångans partialtryck har ett värde, p_d , som ges av ekvationen

$$\ln \frac{p_d}{p_s} = - \frac{\gamma_w \cdot V_w}{RT} \cdot \frac{2}{r} \quad (4.4)$$

Genom att kombinera ekvationerna (4.3) och (4.4) fås

$$\frac{p_d}{p_s} = \left(\frac{p_a}{p_s} \right)^{\frac{2(r-t)}{r}} \quad (4.5)$$

För någorlunda vida kapillärer är $r \gg t$, varvid

$$\frac{p_d}{p_s} = \left(\frac{p_a}{p_s} \right)^2 \quad (4.6)$$

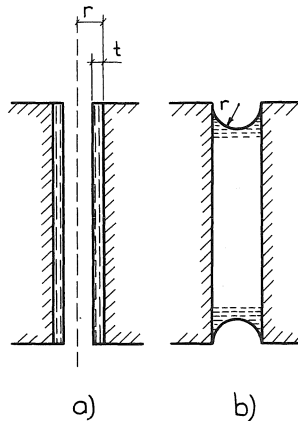


FIG 24 Sorptionshysteresis i en öppen por enligt Cohan (1938 och 1944).

Sorption hysteresis in an open pore according to Cohan (1938 and 1944).

Absorptions- och desorptionsisotermerna för ett tänkt material med porer, som alla har samma diameter och som har formen av öppna, cirkulära kapillärrör får samma utseende som vid "ing-bottle"-teorin (se fig 22b).

Av ekvation (4.5) framgår, att då det adsorberade skiktets tjocklek $t = \frac{1}{2}r$ är $p_d = p_a$ och någon hysteresis erhålls inte (se fig 23b).

Med utgångspunkt från de ovan redovisade förklaringarna till uppkomsten av hysteresis har bl a de Boer (1958) angett tänkbara absorptions- och desorptionsisotermerna för varierande geometri hos materialets porer. De Boer har föreslagit fem olika huvudtyper av hysteresis (se fig 25).

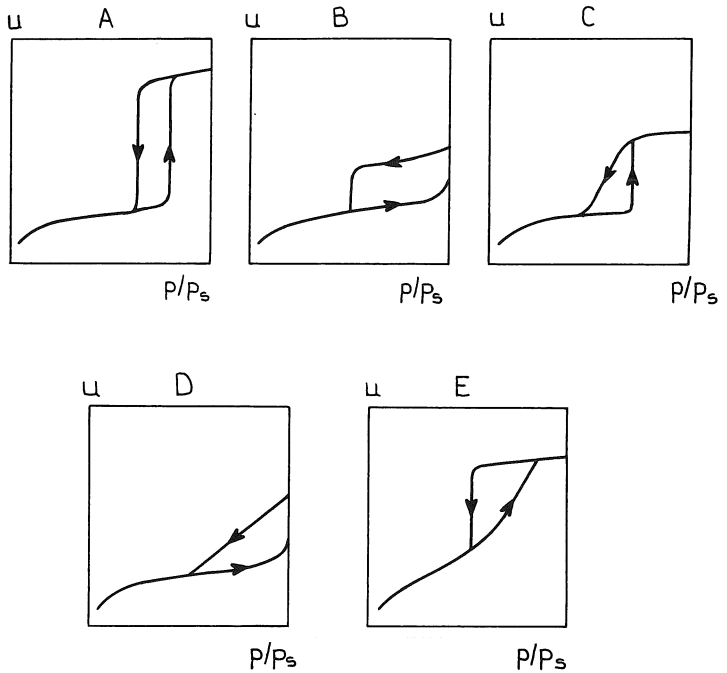


FIG 25 Huvudtyper av hysteresiskurvor enligt de Boer (1958).
Types of hysteresis loop according to de Boer (1958).

Typ A-hysteresis är den som erhålls vid "ink-bottle"-teorin och vid "open-pore"-teorin (se fig 22b). Fig 26 visar några av de porutformningar som enligt de Boer ger typ A-hysteresis. Poren i fig 26b ger typ A-hysteresis, om skillnaden mellan r_1 och r_2 är liten. Tubformade, genomströmningsbara porer med en avsmalnande del med $r_2 < 2r$, (se fig 26d) ger typ A-hysteresis med liten skillnad mellan absorptions- och desorptionsisotermen. Fig 26f visar ett uppslitsat kapillärrör. Vid desorption bestämmer avståndet d , när kapillären töms.

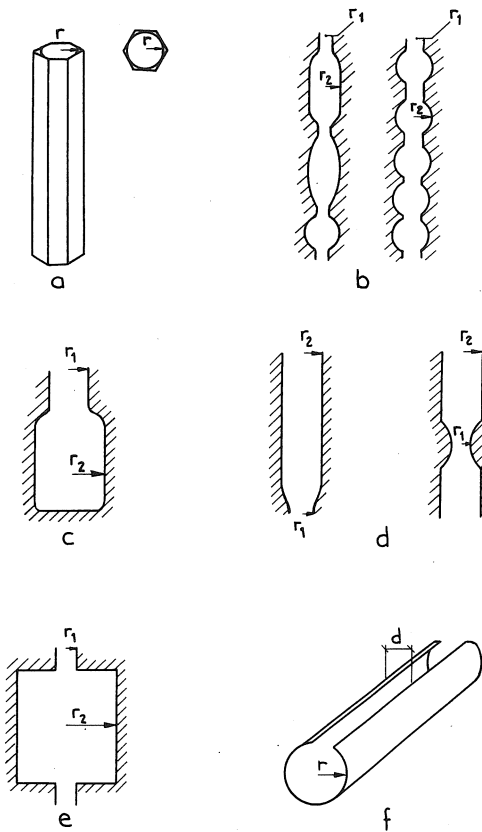
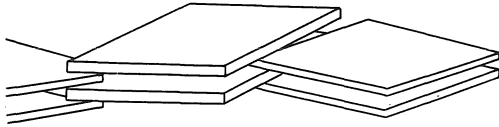
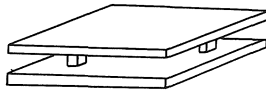


FIG 26 Olika porer som enligt de Boer (1958) ger typ A-hysteresis. Different pores, which according to de Boer (1958) give type A-hysteresis.

Typ B-hysteresis erhålls vid öppna porer, som bildas av plattor med parallella väggar (se fig 27a och b). Om plattorna befinner sig på någorlunda avstånd från varandra, kommer inte utrymmet dem emellan att fyllas förrän vid 100 % RF.



a



b

FIG 27 Olika porer, som enligt de Boer (1958) ger typ B-hysteresis.
Different pores, which according to de Boer (1958) give type B-hysteresis.

Typ C-hysteresis avviker från typ A så till vida att desorptionsisotermen inte har ett språng. Denna typ av hysteresis erhålls för material, som har en heterogen fördelning av den sorts porer, som ger typ A-hysteresis. Den dimension, r_1 , hos poren, som är avgörande för porens tömning, har olika storlekar. Även genomströmningsbara porer, av den typ som illustreras i fig 28a och b, ger typ C-hysteresis.

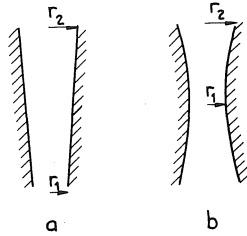


FIG 28 Porer, som enligt de Boer (1958) ger typ C-hysteresis.
Pores, which according to de Boer (1958) give type C-hysteresis.

Typ D-hysteresis, som påminner om typ B-hysteresis, erhålls vid parallella plattor med varierande avstånd mellan plattorna. Även icke-parallella plattor (se fig 29) ger typ D-hysteresis. Om plattorna går ihop eller är så nära varandra att minsta avståndet överbryggas vid polymolekylär adsorption, erhålls inte någon hysteresis.

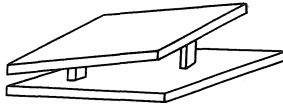


FIG 29 Por, som enligt de Boer (1958) ger typ D-hysteresis.
Pore, which according to de Boer (1958) gives type D-hysteresis.

Typ E-hysteresis erhålls för material som har porer, som ger typ A-hysteresis, om den dimension, r_2 , som är av betydelse vid absorptionen har varierande storlek, medan den dimension, r_1 , som är avgörande vid desorption är konstant (se fig 30).

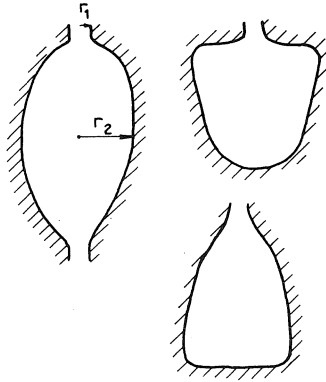


FIG 30 Porer, som enligt de Boer (1958) ger typ E-hysteresis.
Pores, which according to de Boer (1958) give type E-hysteresis.

De ovan beskrivna fem typerna av hysteresis får betraktas som mer eller mindre teoretiska. I verkligheten förekommer säkert de olika portyperna, men en fördelning av olika porformer och dimensioner i ett och samma material förekommer. Härvid erhålls både måttligt lutande absorptions- och desorptionsisotermer, vilket är det normala för byggnadsmaterial (se kapitel 5.3).

4.2.3 Scanning

Som framgår av fig 21 och vad som kort beskrivits ovan kan olika jämviktstillstånd erhållas mellan de båda yttre kurvorna. Sådana kurvor som sammanbinder olika jämviktstillstånd med samma utgångsförutsättningar brukar kallas "scanning-curves".

Förloppet hos scanning-kurvorna bestäms, på samma sätt som vid uppkomsten av hysteresis, av utseendet hos materialets porer och de därmed förknippade kapillärkondensationsfenomenen. Några principiellt olika möjligheter finns att förflytta sig mellan de båda ytterlighetskurvorna. Dessa vägar kan även förklaras på samma sätt och med hjälp av samma enkla pormodeller som användes

ovan. De kurvor som erhålls för verkliga material med heterogen porfördelningar är emellertid endast modifikationer av de kurvor, som erhålls för tänkta material med starkt förenklade porsystem.

Det allra enklaste porsystemet bildas av lika stora, cylindriska porer, som är genomströmningsbara. Av kapitlet ovan framgår, att dessa porer ger typ A-hysteresis (se fig 25). Avbruten desorption i en punkt P på desorptionsisotermen når adsorptionsisotermen i en punkt Q (se fig 31). Om absorptionen avbryts i punkten Q, kommer en avtagande scanning-kurva att erhållas som helt sammanfaller med den föregående kurvan. Punkten P kommer att nås på ett helt reversibelt sätt, och några porer kommer varken att fyllas eller tömmas utefter scanning-isotermerna mellan P och Q.

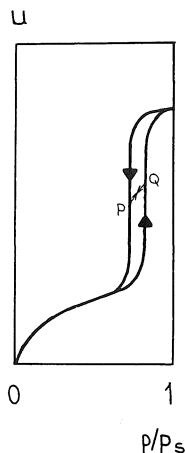


FIG 31 Scanning vid cylindriska, genomströmningsbara porer enligt Broekhoff (1969).

Scanning with cylindrical permeable pores according to Broekhoff (1969).

Andra scanning-kurvor erhålls om materialet är uppbyggt av s k "ink-bottle"-porer. Om radien r_2 i fig 30 är varierande medan r_1 är konstant fås ett material, som uppvisar typ E-hysteresis (se fig 25). Två olika fall kan härvid förekomma beroende på storleken hos flaskhalsens radie i förhållande till radien hos själva

flaskkroppen. För det första kan de båda radierna vara av samma storleksordning. I detta fall avviker inte förhållandet fundamentalt från förhållandet vid öppna cylindriska porer. Om man startar i en punkt P på desorptionsisotermen i fig 32 och når punkten Q på absorptionsisotermen, kommer man direkt tillbaka till P utefter kurva a, om man omedelbart därefter låter relativa fuktigheten avtaga. När man emellertid punkten Q utefter absorptionsisotermen och låter relativa fuktigheten därefter avta, erhålls scanningkurvan b. Då kurva a beskrivs sker detta utan inverkan av kapillärkondensationsfenomen, medan då kurva b beskrivs, töms porerna successivt beroende på flaskkroppens radie.

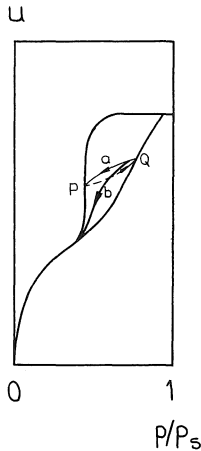


FIG 32 Scanning vid icke-ideala "ink-bottle"-porer enligt Broekhoff (1969).

Scanning with non-ideal "ink-bottle" pores according to Broekhoff (1969).

Ett andra fall erhålls då flaskhalsen är smal i förhållande till flaskkroppen. I punkten P på desorptionsisotermen i fig 33 har ett visst antal porer tömts. Då relativa fuktigheten återigen ökas, kommer dessa inte att fyllas förrän vid i stort sett mättnadsstrycket (se kurva a). På samma sätt som ovan kommer kurva b att ansluta sig till desorptionsisotermen först då denna sammanfaller med absorptionsisotermen

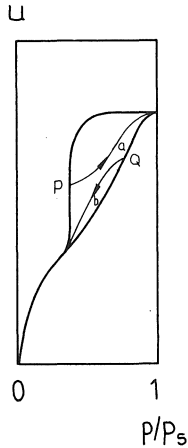


FIG 33 Scanning vid icke-ideala "ink-bottle"-porer med förhållandevis smala halsar enligt Broekhoff (1969).

Scanning with non-ideal "ink-bottle" pores with relatively narrow necks according to Broekhoff (1969).

4.3 Beräkningsteorier

Teorier har framför allt uppställts för att beräkna adsorptionen av gaser eller ångor vid fasta material, och därmed har teorier erhållits för beräkning av isotermens nedre del. Huvudpunkterna i de viktigaste adsorptionsteorierna kommer emellertid endast att presenteras här. För en mera ingående behandling hänvisas till exempelvis Brunauer (1943). Med kännedom om materialets porvolymfördelning kan övre delen av isotermen beskrivas med hjälp av kapillärkondensationsteorin korrigerad för adsorptionen på materialets porväggar. Kapillärkondensationsteorin är beskriven i kapitel 3.3.2.

År 1915 framfördes två oberoende teorier av Langmuir och Polanyi som förklaring till adsorptionen av gaser och ångor på ytor.

Langmuir betraktade ytan hos en fast kropp som en samling adsorptionsställen, där varje ställe har möjlighet att adsorbera en molekyl. Han ansåg vidare, att adsorptionen är en kemisk process och att adsorptionen sker i ett monomolekylärt skikt. Den av Langmuir uppställda ekvationen har kallats den viktigaste för adsorptionsteorin och skrivs på följande sätt:

$$\frac{x}{x_m} = \frac{bp}{1+bp} \quad (4.7)$$

där x = mängden adsorbat per gram adsorbent vid trycket p

x_m = mängden adsorbat per gram adsorbent, när hela ytan är täckt med ett monomolekylärt skikt

b = en koefficient som är direkt proportionell mot temperaturen

Den av Polanyi utvecklade s k "potential"-teorin förutsätter att adsorptionen är en fysikalisk process, vid vilken den adsorberade vätskan är under ett starkt tryck beroende på verkan av krafter vid den fasta ytan. Denna teori tar hänsyn till adsorption i såväl ett som i flera molekylära skikt. Någon ekvation för beräkning av isotermer har emellertid inte givits, varför teorin inte kan användas för beräkning av specifika ytor eller porstorleksfördelningar.

Den utan tvekan mest användbara av adsorptionsteorierna är den som uppställts av Brunauer, Emmet och Teller (1938) vanligtvis känd som BET-teorin. I sin mest allmänna form beskriver ekvationen isotermens utseende vid alla relativa fuktigheter. Användbarheten inskränker sig dock till den nedre delen av isotermer. Vid höga relativa fuktigheter kan teorin användas tillsammans med kapillärkondensationsteorin för att beskriva isotermer.

BET-teorin bygger på Langmuirs teori. Kondensationshastigheten av de adsorberade molekylerna på ytan är proportionell mot ångtrycket, som i Langmuirs teori. Emellertid anses här en molekyl kunna kondensera på ett skikt av tidigare kondenserade molekyler. Vidare anses de molekyler som adsorberas på redan adsorberade molekyler endast ge ifrån sig adsorptionsvärme, som är lika med det latent kondensationsvärmets. Molekylerna i det första skiktet utvecklar emellertid ytterligare adsorptionsvärme utöver kondensationsvärmets. Detta värme representerar energin till följd av växelverkan mellan det

fasta materialet och adsorbatet. Med andra ord anses alltså netto-adsorptionsvärmets för de molekyler, som inte befinner sig i det första skiktet, vara noll. Teorin kräver även, att den adsorberade mängden vid en viss relativ fuktighet är direkt proportionell mot materialets totala inre och yttre yta.

BET-ekvationens vanligaste utseende är:

$$\frac{x}{x_m} = \frac{C\phi}{(1-\phi)(1-\phi+C\phi)} \quad (4.8)$$

där ϕ = relativa fuktigheten; $0 \leq \phi \leq 1$

$$C = K \cdot \exp\left(\frac{Q_1 - L}{RT}\right) \quad (4.9)$$

K = konstant

Q_1 = adsorptionsvärmets i medeltal för det första molekylskiktet

L = ångans normala kondensationsvärme

R = gaskonstanten

T = absoluta temperaturen

Brunauer, Emmett och Teller antog att $K \cdot 1$. Powers och Brownyard (1948) fann emellertid att K är något under ett.

Ekvationen ovan gäller, då utrymmet för adsorption är obegränsat. Om adsorptionen endast kan ske i ett begränsat antal skikt på porväggarna, har Brunauer, Emmet och Teller ansett, att följande ekvation gäller:

$$\frac{x}{x_m} = \frac{C\phi(1-(n+1)\phi^n + n\phi^{(n+1)})}{(1-\phi)(1+(C-1)\phi - C\phi^{(n+1)})} \quad (4.10)$$

där n = maximala antalet skikt, som kan adsorberas

Om $n = \infty$ erhålls standardekvationen ovan, och om $n = 1$ erhålls Langmuirs ekvation med koefficienten $b = \frac{C}{P_s}$

Som kritik mot BET-teorin kan man anföra, att den förutsätter adsorbentens yta på alla punkter (jfr Langmuirs teori ovan) vara helt likformig. Mycket talar emellertid för att ytan hos de flesta fasta material är heterogen i energiavseende. Man kan vidare kritisera modellen för att den inte tar hänsyn till det kraftspel, som förekommer mellan de adsorberade molekylerna i molekylernas eget plan. Det har naturligtvis med rätta även ifrågasatts, om alla molekylskikt efter det första skall betraktas som ekvivalenta. Adsorptionspotentialen avtar ju progressivt, när avståndet från ytan ökar.

BET-ekvationen beskriver emellertid väl isotermens nedre del upp till ca 40 % RF. Då isotermen är känd för ett material, utgör den ett utmärkt hjälpmedel för beräkning av materialets specifika yta (se vidare kapitel 6).

Flera olika modifieringar har gjorts av BET-teorin. Gregg och Sing (1967) beskriver uttömmande dessa försök till förbättringar av denna.

Försök har gjorts att beskriva isotermer med hjälp av Kelvin-ekvationen och kännedom om materialets porvolymfördelning. Närvid har man sett hela isotermens uppbyggnad som ett resultat av kapillärkondensation. Vos och Tammes (1969) redovisar dels en beräknad och dels en experimentellt bestämd kurva (förmodligen absorptionsisoterm?) för högtrycksånghärdad gasbetong (se fig 34). Överensstämmelsen är dålig vid låga relativa fuktigheter, eftersom den adsorberade vattenmängden här försumrats i beräkningen. Höjs den beräknade kurvan upp, kommer avvikelserna även vid höga relativa fuktigheter att bli stora. Detta kan bero på att randvinkeln i praktiken inte är noll. Fullständig vätning föreligger ej. Författarna var emellertid ej helt övertygade om att materialen, som använts vid bestämning av porstorleksfördelningen och vid absorptionsförsöken, var helt identiska.

Kapillärkondensationsteorin och BET-teorin tillsammans ger emellertid möjlighet att beräkna isotermen, vilket visas indirekt i kapitel 7.

Lykow (1966) har angett några empiriska uttryck för beräkning av isotermer. Franchuk har efter anpassning till ett stort antal experimentellt bestämda kurvor uppställt följande samband för beräkning av jämviktsfuktkvoter:

$$u_e = K_1 \phi^2 + K_2 \quad (4.11)$$

där K_1 och K_2 är materialkoefficienter, som varierar med temperaturen. Som synes av formelns uppbyggnad kan inte någon perfekt överensstämmelse erhållas för typ II-isotermer (se fig 18) vid låga relativa fuktigheter.

I området 10-90 % RF anser vidare Lykow, att jämviktsfuktkvoten kan beräknas tillfredställande med hjälp av följande experimentella uttryck:

$$u_e = \frac{K_3 \phi}{K_4 - \phi} \quad (4.12)$$

där K_3 och K_4 är materialkoefficienter som är temperaturberoende.

Fuktkvot, volymsprocent

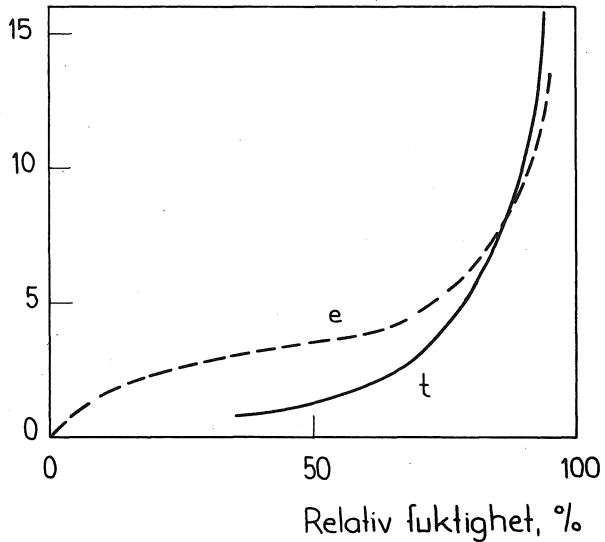


FIG 34 Experimentell (e) och med kapillärkondensationsteori beräknad (t) isoterm för gasbetong enligt Vos och Tammes (1969).

Experimental (e) and with capillary condensation theory calculated (t) isotherm of cellular concrete according to Vos and Tammes (1969).

4.4 Inverkan av temperaturen

Av kapitel 4.1 framgår, att den till materialet fixerade vattenmängden inte bara är beroende av den omgivande luftens relativa fuktighet utan även av dess temperatur. För att åskådliggöra temperaturens inverkan kan man naturligtvis använda en kurvskara med sorptionsisotermer, där varje kurva representerar en viss temperatur. Temperaturens inverkan kan även beskrivas med hjälp av sorptionsisobarer. Fuktkvoten ges då som funktion av temperaturen, medan relativa fuktigheten eller vattenångans partialtryck är konstant. Ett tredje sätt att åskådliggöra temperaturens inverkan är att i ett diagram avsätta logaritmen för partialtrycket som funktion av inverterade absoluta temperaturen vid konstant jämviktsfuktkvot. Dessa kurvor kallas sorptionsisosterer och kan användas för beräkning av adsorptionsvärmets. Sorptionsisostererna approximeras nämligen väl med följande ekvation (se kapitel 3.3.1):

$$p = \text{konst} \cdot \exp\left(-\frac{q_{st}}{RT}\right) \quad (4.13)$$

där p = vattenångans partialtryck

R = gaskonstanten

T = absoluta temperaturen

q_{st} = isostera adsorptionsvärmets

Sorptionsisostererna erhålls alltså i stort sett som räta linjer och med hjälp av linjernas lutning kan adsorptionsvärmets beräknas. Fig 35, hämtad från Harmathy (1967), visar sorptionsisosterer för en speciell tegelsort. Isostererna är inte exakt parallella beroende på att adsorptionsvärmets varierar med jämviktsfuktkvoten.

Fixeringen av vattenånga till ett byggnadsmaterial bestäms huvudsakligen av adsorption och kapillärkondensation. Temperaturens inverkan på adsorptionsbidraget erhålls med hjälp av ekvation (3.12).

$$\frac{dG}{dT} = \frac{x}{M} \left(\frac{d\mu'_v}{dT} + R \ln p \right) \quad (4.14)$$

där G = Gibb's fria energi

M = vattnets molekylvikt

x = fuktkvoten

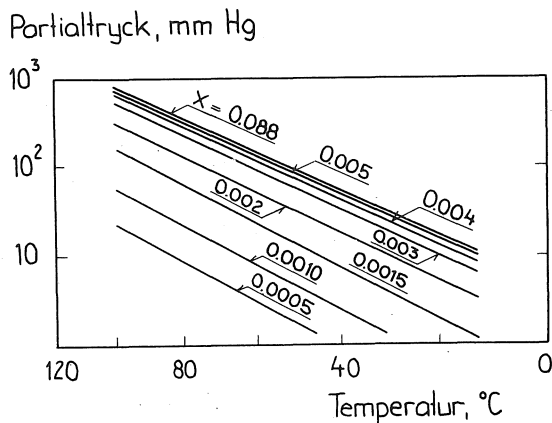


FIG 35 Absorptionsisosterer enligt Harmathy (1967) för en tegelsort med densiteten = 2700 kg/m^3 .
Sorption isosteres according to Harmathy (1967) of a brick with density = 2700 kg/m^3 .

Om temperaturen alltså t ex sänks och relativa fuktigheten är konstant, kommer jämviktsfuktkvoten att öka. Temperatursänkningen medför nämligen att fria energin ökar. Vid ytterligare adsorption av vatten sänks emellertid fria energin, och jämvikt erhålls åter med den omgivande luften.

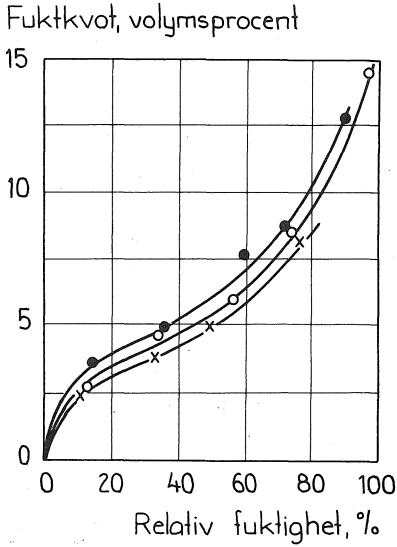
Temperaturens inverkan på kapillärkondensationen är relativt liten, vilket framgår av Kelvins ekvation och som illustreras i fig 16 (se kapitel 3.3.2). Eftersom

En temperatursänkning medför även här, att fria energin ökar, och därmed ökas även den kapillärkondenserade fuktmängden.

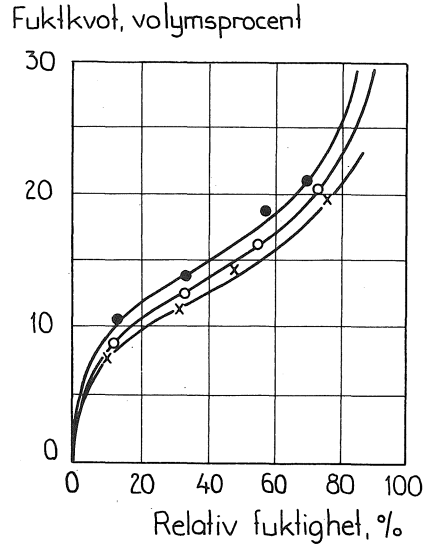
Adsorption och kapillärkondensation är alltid exoterma processer, vilket betyder att de sker under avgivande av värme. På grund härav måste jämviktsfuktkvoten öka, när temperaturnivån minskar. Den osmotiska bindningen är emellertid under idealiska förhållanden en endotermisk process, som alltså sker under upptagande av värme. Denna effekt reduceras eller kan helt elimineras av avvikelser från ideala förhållanden. Dessa avvikelser beror framför allt på växelverkan mellan molekyler eller joner i lösningen. Denna växelverkan är emellertid en exoterm process.

Generellt brukar man hävda, att temperaturberoendet är utan betydelse för oorganiska material men har viss betydelse för organiska material. Sorptionsisotermerna i fig 36 och 37 enligt Tveit (1966) och Krischer (1956) understryker detta förhållande. Vid studium av kurvorna i fig 36 och 37 finner man, att inverkan av temperaturnivån inte ändras över ca 20 % RF. Avståndet mellan kurvorna förändras i stort sett inte. Vid högre relativa fuktigheter är det ju framför allt kapillärkondensationen och i vissa fall även den osmotiska bindningen som bestämmer absorptionen av vatten. Dessa båda processer är som framgått av ovanstående måttligt temperaturberoende. Större är däremot temperaturens inverkan på adsorptionsprocessen. Det förefaller därför rimligt att påstå att i de fall då temperaturnivån har betydelse, grundläggs temperaturberoendet vid låga relativa fuktigheter. Adsorptionen av de första molekylskikten är avslutad vid 20-30 % RF, och i området därunder är det uteslutande den rena adsorptionen som är verksam. Att som Vos och Tammes (1969) hänföra temperaturberoendet till kapillärkondensationsprocessen bedöms därför som felaktigt.

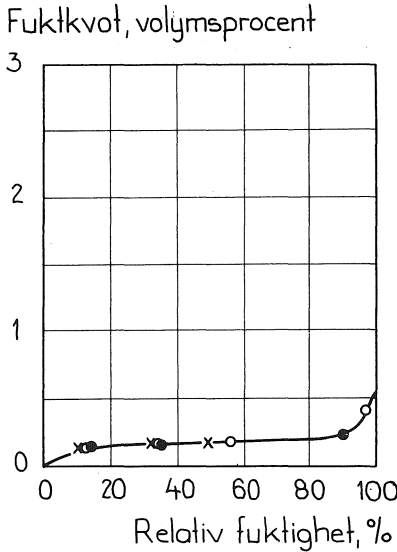
Som förklaring till varför vissa material uppvisar större temperaturberoende än andra, kan man tänka sig följande: De material som har temperaturberoende isotermer har klart högre jämviktsfuktkvoter vid ca 20 % RF än de som är oberoende av temperaturen. Vid denna relativa fuktighet har temperaturberoendet i stort sett grundlagts. Ekvationen (4.14) ovan säger även, att ju större adsorberad fuktkvot desto större temperaturberoende, varför den gjorda observationen stöds av teorin. Temperaturberoendet hos olika material bestäms alltså av deras förmåga att genom adsorption binda vatten. Avgörande är härvid materialens specifika yta.



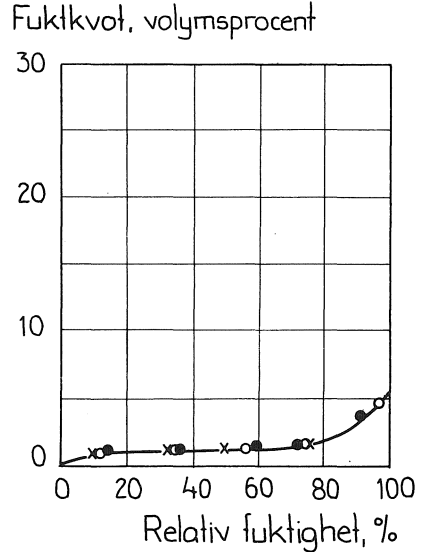
a)



b)



c)



d)

FIG 36 Absorptionsisotermer enligt Tveit (1966).

Absorption isotherms according to Tveit (1966).

- | | | | |
|---|---------------------------------------|---|-----------------------------------------------------|
| a | gran; spruce, 530 kg/m ³ | c | tegel; brick, 1720 kg/m ³ |
| b | läder; leather, 940 kg/m ³ | d | gasbetong; cellular concrete, 510 kg/m ³ |

Fuktkvot, viktprocent

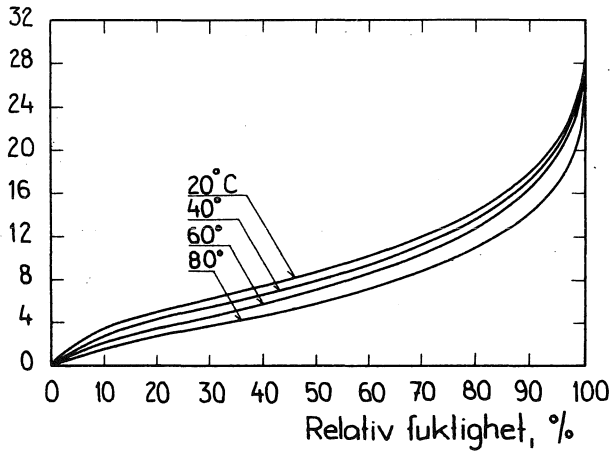


FIG 37 Sorptionsisotermer för trä enligt Krischer (1956).
Sorption isotherms of wood according to Krischer (1956).

5 BESTÄMNING AV ISOTERMER FÖR BYGGNADSMATERIAL

5.1 Apparat

5.1.1 Allmänt

För byggnadsmaterial är det viktigt att kunna bestämma jämviktsfukt-kvoter vid höga relativa fuktigheter. Värdefulla upplysningar kan härvid erhållas för att kunna knyta samman det hygroskopiska området med vätskeområdet vid t ex studier av fukttransport i porösa material.

Stora krav måste härvid ställas på noggrannheten hos relativa fuktigheten, eftersom isotermer för byggnadsmaterial är mycket branta vid höga relativa fuktigheter. Små ändringar av relativa fuktigheten ger stora ändringar hos jämviktsfuktkvoten. Kraven på relativa fuktigheten medför även, att stora krav måste ställas på temperaturstabiliteten.

Önskade relativa fuktigheter och temperaturer måste kunna ställas in utan alltför mycket besvär. Utrustningen måste vidare ha stor kapacitet.

Det är mycket vanligt, att man bestämmer isotermer med hjälp av ratur, där materialproven förvaras under ett relativt högt vakuum. Proven omges härvid endast av vattenånga med önskat tryck. En stor fördel är, att jämviktstillstånd kan erhållas efter förhållandevis kort tid. Eftersom byggnadsmaterialen vanligtvis används i en miljö med luft, och då man vet, att närvaro av luft kan påverka den fixerade vattenmängden (se kapitel 4.2.2), ville vi i våra försök undvika bestämning under vakuum. Svårigheter skulle även kunna föreligga rent försökstekniskt, då relativt stora materialprov måste användas, för att proven skall vara representativa för vissa typer av material.

Med utgångspunkt från de ovan redovisade kraven konstruerades och byggdes en apparat vid Byggnadsmateriallära, LTH. Som modell till denna apparat har stått en utrustning, beskriven av Amdur och White (1965). Denna utrustning används bl a vid Honeywell Regulator Company för kalibrering och kontroll av utrustning för mätning och registrering av relativ fuktighet. Den i Lund tillverkade apparaten bygger på samma princip, men konstruktionen har ändrats på ett flertal punkter.

Apparaten benämnes "två-tryck-apparat" i vilken en komprimerad gas är mättad. Därefter får den expandera till ett lägre tryck. Principen bygger på antagandet att vattenångans partialtryck i en gasblandning förblir en viss bestämd andel av det totala trycket, när det totala trycket ändras, eller med andra ord att Dalton's lag gäller. För en ideal gas gäller

$$\frac{p_s}{p_1} = \frac{p_2}{p_2} \quad \text{eller} \quad (5.1)$$

$$\% \text{ RF} = 100 \cdot \frac{p_2}{p_s} = \frac{p_2}{p_1} \quad (5.2)$$

där p_s = vattenångans mättnadstryck vid totaltrycket p_1

p_2 = omättat vattenångtryck vid det lägre totaltrycket p_2 .

För luft-vattenångblandningar har man emellertid funnit att

$$\% \text{ RF} = 100 \cdot \frac{p_2}{p_1} + K \quad (5.3)$$

där K = korrektionsfaktor

I området $10 \leq \% \text{ RF} \leq 100$ är $0,25 \leq K \leq 0$. Vid höga relativa fuktigheter är alltså korrektionsfaktorn försumbar, vilket är av vikt med hänsyn till kraven ovan.

Det är viktigt, att luften med högt tryck verkligen är mättad med vattenånga. Av stor betydelse är det härvid, att temperaturen hos luften i alla lägen är konstant.

5.1.2 Beskrivning

Apparatens principiella uppbyggnad framgår av fig 38. Luft från laboratoriesystemet renas från olja, vatten och andra främmande beståndsdelar (1), och trycket kan därefter reduceras med hjälp av en regleringsventil (2). Ledningen är försedd med automatisk avstängningsanordning (3), som träder i funktion om brott sker på systemet och trycket hastigt faller på sekundärsidan. Luften passerar därefter ett filter, som innehåller andningskalk (4) för att rena luften från koldioxid och koloxid. Luften går sedan igenom ytterligare ett avskiljningsfilter (5), innan den kommer till precisionsregulatorn (6), som reglerar in det önskade övertrycket p_1 . Denna tryckregulator klarar ett tryck på 10 atö på primärsidan och kan ge 0-4,2

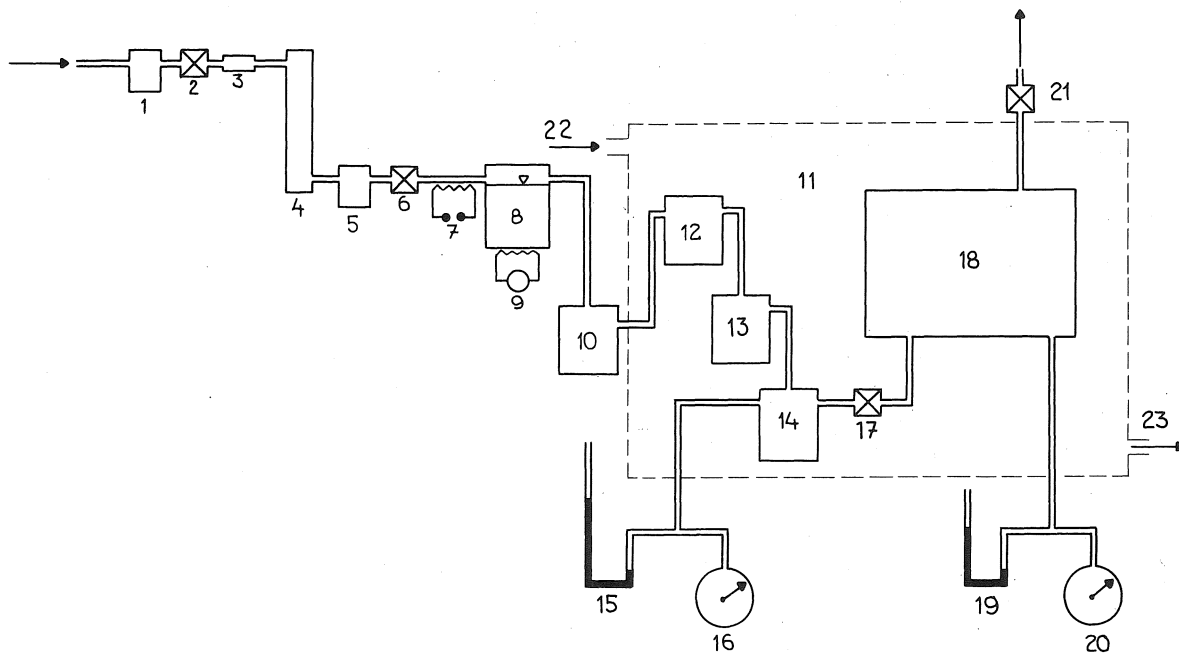


FIG 38 Principritning över "två-trycks-apparaten".
 Drawing of principle of "two-pressure-apparatus".

atö på sekundärsidan. Vid 4,2 atö är felet max $\pm 0,0$ % och vid 0,35 atö är felet max $\pm 0,5$. Dessa fel reduceras emellertid, då precisionsregulatorn föregås av en annan regleringsventil, som gör att trycket på primärsidan är i stort sett konstant, och att tryckfallet över precisionsregulatorn blir begränsat. Luften förvärmes, därefter med hjälp av en värmetråd (7) virad kring tillloppsroret till en stor behållare (8) med vatten. Behållaren värms i botten med en värmespiral (9). Värmespiralen är försedd med en effektregulator, som gör att vattnet i behållaren hålls vid en konstant temperatur på ca 60°C . Behållaren är så konstruerad att luften tvingas ned över vattenytan. Varm fuktig luft lämnar behållaren och kyls något i en yttre rörslinga, innan den kommer till vattenavskiljaren (10). Luften strömmar därefter i rörslingor av koppar, som är nedsänkta i ett stort, tempererat bad med metanol (11). Luften antar efter hand badets temperatur, och vatten kondenseras bort och samlas i vattenavskiljare (12, 13 och 14). Dessa är dränerade och töms med hjälp av systemets övertryck genom kranar på utsidan. Till den sista av dessa vattenavskiljare är kopplade dels en kvicksilvermanometer (15) och dels en precisionstryckmätare (16) för avläsning av trycket P_1 . Kvicksilvermanometern har en graderingslängd på 1200 mm. Precisionstryckmätaren, som används vid tryck över 1200 mm Hg, är graderad mellan 0 och 4 atö och har en noggrannhet på 0,5 %. Efter den sista vattenavskiljaren reduceras lufttrycket till P_2 i två parallellt kopplade ventiler (17). Den ena är en precisionsregulator av samma typ som ovan, men den ger 0-0,5 atö på sekundärsidan. Den andra är en enklare reduceringsventil. Denna är emellertid fullt tillräcklig, eftersom trycket på primärsidan är konstant. Efter att ha strömmat i ytterligare några rörslingor kommer luften till testkammaren (18), som även den befinner sig nedsänkt i badet. Testkammaren har dimensionerna 0,5 x 0,4 x 0,3 m. Till testkammaren är anslutna dels en kvicksilvermanometer (19) och dels en precisionstryckmätare (20). Kvicksilvermanometern har en graderingslängd på 300 mm, medan tryckmätaren, som är av samma typ som den ovan beskrivna, är graderad mellan 0-1 atö. Med dessa båda manometrar avläses övertrycket P_2 . Från testkammaren strömmar luften ut i rummet via en ventil (21) med vilken den genomströmmande luftmängden kan varieras.

Det tempererade badet, som innehåller ca 400 liter metanol, är anslutet till en Ultrakryostat, UK-30D i två diagonalt motsatta hörn (22) och (23). Från Ultrakryostatens interna bad pumpas metanol till och sugas från det yttre betydligt större badet via väl isolerade ledningar. Även det yttre badet är väl isolerat. Ultrakryostaten reglerar temperaturen i sitt eget bad med en noggrannhet på $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ inom ett temperaturområde mellan -40 och $+40^{\circ}\text{C}$. Fig 39 visar apparaturens utseende och fig 40 den i badet nedsänkta utrustningen.

5.1.3 Användning

De tryck P_1' och P_2' , som inställes med de två tryckregulatorerna (6) och (17) är övertryck. Relativa fuktigheten, som erhålls i testkammaren, bestäms därför av

$$\% \text{ RF} = 100 \cdot \frac{P_2}{P_s} = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2' + B}{P_1' + B} \cdot 100 \quad (5.4)$$

där B = barometerståndet

Vid inställning av önskad relativ fuktighet avläses därför först barometerståndet på en i lokalen hängande barometer. Övertrycket P_2' har vid försöken varit 20 eller 30 mm Hg. Tabeller har gjorts upp för dessa båda tryck. Tabellerna ger erforderligt övertryck P_1' vid önskad relativ fuktighet och avläst barometerstånd.

Laboratoriets tryckluftssystem och regleringsventilens (6) begränsningar gör att lägsta möjliga relativa fuktighet är 20 %. Högsta relativa fuktighet, vid vilken försök har utförts, är 98 %. Önskad relativ fuktighet mellan dessa båda värden inställes snabbt och byte av klimat görs alltså på ett mycket enkelt och tidsbesparande sätt.

Temperaturen har vid samtliga försök varit $+20^{\circ}\text{C}$. Denna har injusterats med Ultrakryostatens termostat.

Vattenbehållarens (8) kapacitet har varit sådan, att avjonat vatten endast har behövt fyllas på ca: en gång i veckan, medan vattenavskiljarna (10, 12 och 13) har tömts ca två gånger i veckan. Den sista avskiljaren (14) har alltid varit utan vatten. Under normala omständigheter har de inställda trycken inte behövt justeras mer än två gånger i veckan.

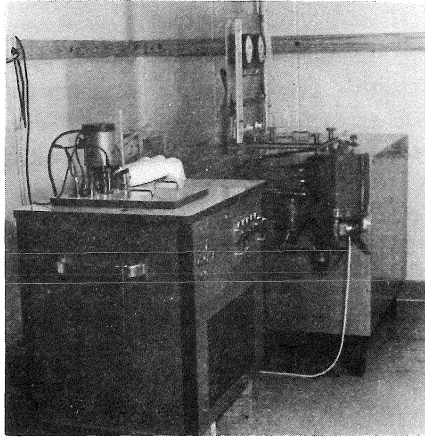


FIG 39 "Två-trycks-apparat" med Ultrakryostat.
"Two-pressure-apparatus" with Ultrakryostat.

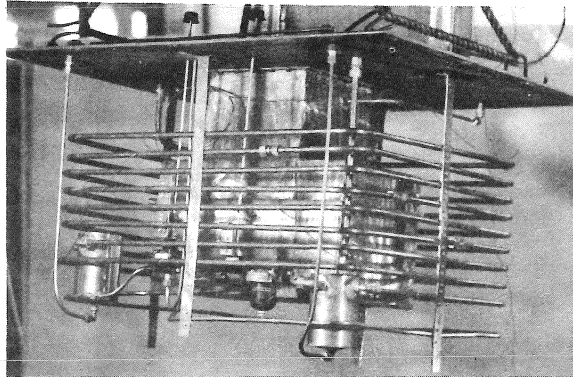


FIG 40 Den del av apparaten som är nedsänkt i metanolbadet.
The part of the apparatus which is sunk down into the bath of methyl alcohol.

5.1.4 Noggrannhet

Mätningar av temperaturer har utförts under en längre period dels i badets fyra hörn samt dels i testkammaren och i sista vattenavskiljaren (14). Temperaturvariationerna i de enskilda punkterna var mindre än $0,05^{\circ}\text{C}$. Skillnaden mellan de olika punkterna var mindre än $0,1^{\circ}\text{C}$.

Om barometerståndet ändrar sig hastigt och radikalt, kan detta påverka relativa fuktigheten. En ändring av barometerståndet från 745 mm Hg till 765 mm Hg medför, att relativa fuktigheten ändras med 0.25 % RF vid 20 % RF och med 0,002 % RF vid 98 % RF. Inverkan vid höga relativa fuktigheter är alltså försumbar. Variationen vid låga relativa fuktigheter är även den utan betydelse, då jämviktstillståndet hos ett material härvid ändras obetydligt.

Logaritmering och differentiering av ekvation (5.4) ger

$$\frac{|dp_2|}{p_2} = \frac{|dp_s|}{p_s} + \frac{|d(P_2' + B)|}{(P_2' + B)} + \frac{|d(P_1' + B)|}{(P_1' + B)} \quad (5.5)$$

Om temperaturen hos den med vattenånga mättade luften skulle sjunka så att luften inte är mättad, när den når ventilen (17), erhålls ett fel hos p_s . Av betydelse är härvid hastiga temperaturfall, som med det stora, tröga metanolbadet är osannolika. Temperaturmätningarna, redovisade ovan, ger vid handen att dessa variationer inte kan överstiga $0,01^{\circ}\text{C}$. Denna temperatursänkning ger vid $+20^{\circ}\text{C}$ en ändring av mättnadsångtrycket med 0,01 mm Hg. dp_s är alltså maximalt 0,01 mm Hg.

En felberäkning är framför allt av intresse vid höga relativa fuktigheter. Eventuella ändringar hos barometerståndet kan härvid försummas. Tryckregulatorn (6) garanteras ha en noggrannhet på 0,5 % vid ca 200 mm Hg. Då trycket på regulatorns primärsida är i stort sett konstant och reducerat av en ventil före, kan med säkerhet detta fel även kunna garanteras vid 50 mm Hg ($P_1' = 50$ mm Hg ger ca 98 % RF). Om avläsningsnoggrannheten uppskattas till 0,5 mm Hg, blir således $d(P_1' + B)$ maximalt 0,75 mm Hg.

Något regleringsfel finns inte hos trycket P_2' men däremot ett avläsningsfel på maximalt 0,5 mm Hg.

Maximala felet vid höga relativa fuktigheter kan således uppskattas till

$$\frac{dp_2}{p_s} \sim \frac{dp_2}{p_2} < \pm \left(\frac{0,01}{17,5} + \frac{0,5}{790} + \frac{0,75}{810} \right) = \pm 0,002$$

Maximala felet kan alltså uppskattas till 0,2 % RF vid höga relativa fuktigheter.

5.2 Försöksmetodik

I den ovan beskrivna apparaturen har sorptionsisotermer bestämts för olika byggnadsmaterial. Systematiska undersökningar av variationerna inom en viss materialfamilj har inte utförts, ej heller har variationerna hos en viss materialtyp eller ett visst fabrikat undersökts. Prover har godtyckligt utvalts av olika materialslag och fabrikat för att erhålla en bild av materialets fuktfixeringsförmåga och därmed förknippade egenskaper.

För att karakterisera materialen har deras densitet och i vissa fall även deras öppna porositet bestämts.

De uttagna provstyckena har valts, så att representativa prov av materialet har erhållits. Provstyckena har sönderdelats i måttlig utsträckning. Två eller ibland tre separata prov har tagits av varje material.

Försöken har startat med bestämning av desorptionsisotermer. För att den övre ytterlighetskurvan verkligen skall erhållas, har materialproven fyllts med vatten före försökets början. I de flesta fall har kapillär uppsugning av vatten skett under vakuum. I några fall har materialen fått suga vatten nedsänkta under ytan. För att förkorta tiden till dess materialens fuktinnehåll är i närheten av det hygroskopiska området, har en del material förvarats någon tid över en vattenyta i en evakuerad *exsikator*. Jämviktshuktigheter har därefter bestämts i testkammaren vid relativa fuktigheter mellan 98 och 20 eller 25 %. I något fall mellan 95 och 20 eller 25 % RF.

För bestämning av absorptionsisotermer har materialen därefter fått torka i en evakuerad *exsikator* med torkmedel (silika gel eller dehydrit). Absorptionsisotermer har sedan bestämts mellan samma gränser för relativa fuktigheten som vid desorption.

Vid bestämning av t ex en avtagande scanning-kurva har torra prov placerats i testkammaren tillsammans med material, för vilka

desorptionsisotermer höll på att bestämmas.

Materialproven har förvarats i provskålar. Vid varje försöksserie har ca 70 stycken skålar stått i testkammaren. För att konstatera när materialen kommit i jämvikt med klimatet i testkammaren, sattes ett tättslutande lock på skålen och provet togs upp och vägdes på en 1200 g's Mettlerväg med möjlighet att avläsa vikten på 0,01 g när. Endast ett fåtal skålar behövde vägas, då man snart visste, vilka som behövde längst tid, tills jämvikt inställt sig. När viktändringar inte kunde iakttagas längre vid vägning ca var tredje dag, vägdes samtliga skålar och relativa fuktigheten ändrades där- efter i testkammaren.

När båda kurvorna genomlöps, vilket tog ca ett år, torkades de flesta materialen i värmeskåp vid 105°C. Andra torkades antingen vid lägre temperatur eller i evakuerad exsickator med torkmedel. De olika jämviktsfuktkvoterna kunde därefter beräknas. För vissa material ändrades emellertid torrvikten under försökets gång. Detta gäller framför allt de cementbundna materialen. För att kunna beräkna materialets verkliga torrsvikt bestämdes den kemiskt bundna vattenmängden vid tre olika tillfällen på särskilda prover, som fick genomgå samma behandling som de övriga. Bestämning av det kemiskt bundna vattnet utfördes vid försökets start och avslutning samt vid övergången från desorption till absorption. Det kemiskt bundna vattnet bestämdes genom uttorkning i ugn vid 1000±25°C.

5.3 Försöksresultat

Sorptionsisotermer har bestämts för ett stort antal byggnadsma- terial, vilka representerar de idag mest använda porösa byggnads- materialen. Totalt har isotermer för ett 100-tal material med va- rierande sammansättning bestämts. För de flesta materialen har både absorptions- och desorptionsisotermer bestämts. Bilaga I utgör en sammanställning av en stor del av dessa.

Isotermer har bestämts för 16 olika betongkvaliteter. Fig I:1-8 återger ett intressant urval av dessa. De övriga har i stort sett samma sammansättning som någon av de presenterade. Betongerna är gjutna under kontrollerade laboratorieförhållanden och härdnings- betingelserna har varit normala. Standardcement har använts och maximal stenstorlek är 32 mm i samtliga fall. I några fall har

luftporbildande tillsatsmedel använts. De undersökta proven har haft en vikt på mellan 40 och 50 g, varför noggrannheten vid vägningen uppskattas till ca 0,05 viktsprocent. Det kemiskt bundna vattnet har, som ovan beskrivits, bestämts vid tre tillfällen. Korrigering av torrvikternas ändring under försökets gång har med ledning härav måste göras. För betongerna i fig I:1 och I:5 har endast absorptionsisotermerna bestämts. De förhållandevis låga hydratationsgraderna gick ej att bibehålla, då desorptionsproceduren skulle utföras. För betongerna i fig I:2 och I:3 har scanning-kurvor bestämts.

Absorptions- och desorptionsisotemer har bestämts för två olika cementbruk och ett kalkcementbruk, vilket framgår av fig I:9, I:10 resp I:11. Storleken av de i försöket använda proven har varit samma som för betong. Korrigering för ändrad torrsvikt har gjorts.

Fig I:12-15 visar isotemer för lättbetong av typen porballastbetong, där ballasten har utgjorts av expanderad lera och i viss utsträckning av finsand. Sammansättningen är i detalj känd endast för lättbetongen i fig I:12. Den färska betongens vattenhalt har här bestämts genom uttorkningen vid 1000°C. I blandaren hade tillsatts endast 100 l vatten per m³, men till följd av stort fukttnehåll i porballasten blev vattenhalten hos den färska blandningen 140 l/m³. Fig I:13 och I:14 visar isotemer för lättbetong i form av färdigtillverkade murblock med olika densiteter. För dessa båda kvaliteter har även scanning-kurvor bestämts. De i fig I:14 avsatta värdena utgör medelvärden av två resultat vid varje luftfuktighet. Materialen i fig I:12 och I:14 har härdats på normalt sätt, medan murblocken i fig I:13 och I:14 har ånghärdats vid ca 60°C vid normalt tryck under ca 12 timmar.

Fig I:16-18 visar isotemer med scanning-kurvor i två fall för asbestcementprodukter. Materialet i fig I:18 innehåller förutom asbestfibrer även cellulosafibrer. Produkterna är pressade och ånghärdade.

Isotemer för kalksandsten framgår av fig I:19-21. De två första kurvorna gäller för två svenska produkter, medan den tredje representerar en dansk produkt. Dessa material har framställts av kvartssand eller krossad sandsten, kalk och vatten. De är pressade och har ånghärdats i ca 8 timmar under tryck. Materialen byggs således upp av olika kalciumsilikater.

Ett annat materialslag, som är uppbyggt av kalciumsilikater och deras hydrater, är högtrycksånghärdad gasbetong. Isotermerna i fig I:22-26 representerar de svenska gasbetongprodukterna. Materialet i fig I:26 är en extra lätt experimentprodukt. De i figurerna inprickade resultaten representerar medelvärdet av två olika försöksresultat.

Torrvikten för samtliga material, som redovisats ovan, måste justeras, för de ånghärdade materialen dock i relativt liten utsträckning.

Fig I:27-30 återger isotemer för fyra olika tegelsorter med varierande bränningsgrader och densiteter. Viss justering av torrvikten visade sig även nödvändig för tegelmaterialen. Den genom hydratisering kemiskt bundna vattenmängden under bestämningen av en absorptionsisoterm uppgick till ca 0,1 viktsprocent, vilket får anses vara mycket med hänsyn till att jämviktsfuktkvoten vid 98 % RF är under 1 viktsprocent.

Fig I:31 ger isotermerna för ett annat sintrat material, nämligen lättklinkerkorn.

Isotermerna för två relativt lätta mineralullsprodukter framgår av fig I:32 och I:33. De i figurerna inprickade värdena utgör medelvärden av två separata försöksresultat. Noggrannheten hos de enskilda jämviktsfuktkvoterna uppskattas till ca $\pm 0,5$ viktsprocent till följd av fel vid vägning av de relativt små provstyckena.

Fig I:34 återger isotermerna för gips (kalciumdihydrat) blandad i laboratorium utan tillsats av retardator. Torkningen för bestämning av torrvikten har här utförts i värmeskåp vid 60°C.

Absorptionsisotermerna för två naturstensprodukter har bestämts. Fig I:35 visar isotermen för en röd, hård sandsten och fig I:36 isotermen för en grå kalksten.

Fig I:37-42 återger resultaten erhållna för några vanliga träslag. Utöver de scanning-kurvor för furu och gran, som går från 43 % RF på desorptionskurvan och över i absorption, har för dessa båda material även scanning-kurvor utgående från 98 % RF på absorptionskurvan bestämts. Dessa har emellertid inte inprickats, då de redan vid ca 90 % RF har anslutit sig till desorptionsisotermen.

Isotermerna har även bestämts för ett urval av träbaserade produkter, vilket framgår av fig I:43-48. På samma sätt som för träslagen ovan har även för hård träfiberskiva och spånskiva scanning-kurvor utgående från 98 % RF bestämts. Resultatet blev emellertid detsamma som ovan.

Fig I:49 visar absorptions- och desorptionsisotermerna för kork. Även absorptionsisotermen för korkmjöl har bestämts.

Isotermerna för två slags cellplaster har bestämts. Fig I:50 visar absorptions- och desorptionsisotermerna för cellplast av expanderad polystyren och fig I:51 absorptionsisotermen för cellplast av polyuretan. Torrrikterna har här bestämts genom torkning under vakuum i närvaro av torkmedlet dehydrit. Noggrannheten hos de enskilda jämviktsfuktkvoterna uppskattas till ca $\pm 0,5$ viktsprocent, till följd av fel vid vägning av de relativt små provstyckena.

Fig I:52 visar isotermerna för en juteväv.

Isotermerna har även bestämts för ett flertal olika plast- och lino-leummattor. Fig I:53 och I:54 ger exempel på isotermerna för lino-leummattor respektive plastmattor. Torrrikterna har bestämts vid torkning i exsickator, vilken är satt under vakuum och som innehåller dehydrit.

6 BESTÄMNING AV SPECIFIKA YTOR

6.1 Allmänt

Adsorptionen av gaser på fasta material erbjuder en utmärkt möjlighet för beräkning av specifika ytor. Härvid bestäms den mängd adsorbat, som behövs för att täcka totala materialytan med ett monomolekylärt skikt. Ett materials specifika yta är direkt proportionell mot mängden monomolekylärt adsorberat vatten enligt följande uttryck

$$S = \frac{x_m^N}{M} A_m \cdot 10^{-2} \quad (6.1)$$

där S = specifika ytan, m^2/g

x_m = monomolekylära kapaciteten, kg/kg

N = Avogadros tal, $l/kmol$

M = adsorbatets molekylvikt, $kg/kmol$

A_m = den yta som upptas av en adsorberad molekyl, Å^2

Den mängd adsorbat som binds till ett material är beroende av vilket adsorbat som används. Stor betydelse har även referenstillståndet, alltså vilken metod som har använts för att avlägsna adsorbatet vid bestämning av den adsorberade mängden (se kapitel 3.1).

Specifika ytor bestäms vanligtvis med hjälp av kvävgasadsorption. God överensstämmelse har härvid erhållits med resultat från direkta mätningar, utförda med elektronmikroskop. Flera andra gaser och ångor har emellertid använts. En så noggrann bestämning som möjligt av materialets verkliga specifika yta kräver, att de adsorberade molekylerna är små och kan ta sig in genom smala poröppningar eller överhuvudtaget kan komma in i fina porer. Kvävemolekylen är relativt liten och ger därför goda resultat. Den kan emellertid inte komma in i porer, som har en diameter på 4-5 Å eller mindre.

Specifika ytor har emellertid även bestämts med hjälp av vattenångsadsorption. Vattenmolekylen är mindre än kvävemolekylen. Vattenmolekylens dipolmoment och dess därmed stora affinitet till materialytor medverkar även till att samma ytor bestäms som vid kvävgasadsorption, trots närvaron av luft.

Förhållandena kan illustreras med de skiljaktigheter, som råder beträffande bestämning av specifika ytor för cementpasta.

Enligt Feldman och Sereda (1968) blir de specifika ytor, som bestäms med hjälp av vattenånga för stora. Vatten binds nämligen mellan tobemoritskikten (zeolitiskt vatten, se kapitel 3.1 och 3.2) och dessa utrymmen kommer därför att bidra till specifika ytan. Utrymmena är emellertid inte tillgängliga för kvävemolekyler. Feldman och Sereda anser, att det zeolitiska vattnet skall räknas till det kemiskt bundna och använder istället P-torkning (se kapitel 3.1), varvid det mesta av det zeolitiska vattnet blir icke-förångningsbart och bidrar därmed inte till specifika ytans storlek. Brunauer et al (1970) hävdar emellertid, att vid P-torkning kommer även en del av det adsorberade vattnet att höra till det icke-förångningsbara, varför Feldmans och Seredas specifika ytor är för små. Vid D-torkning eller torkning vid 105°C kommer emellertid både det zeolitiska och allt det adsorberade att höra till det förångningsbara vattnet.

Av ovanstående framgår det, att torkningsprocedur och val av adsorbat är av betydelse. Är man emellertid intresserad av egenskaper hos porösa byggnadsmaterial och hur dessa påverkas av den mängd fukt som är bunden till materialet, förefaller det vara mera intressant att känna de specifika ytor som är tillgängliga för vattenmolekyler än för kvävemolekyler. Under naturliga förhållanden är det vattenånga som binds till de porösa byggnadsmaterialen. De övriga gaserna i luft har betydligt svagare bindningskrafter och adsorberas i mycket ringa omfattning.

Med hjälp av isotermer för ett material kan den erforderliga monomolekylära kapaciteten bestämmas. Den mest kända och mest använda metoden härvid är den som föreslagits av Brunauer, Emmett och Teller (1938). Deras teori, den s k BET-teorin (se kapitel 4.3), har framför allt visat sig användbar för typ II isotermer (se fig 18). Samtliga isotermer för byggnadsmaterial kan anses vara typ II isotermer. Vattenånga är vidare ett adsorbat som bättre än de flesta övriga uppfyller BET-teorins speciella krav på att adsorptionsenergin är betydligt större för det första skiktet än för de övriga. Avsnittet nedan behandlar beräkning av specifika ytor med hjälp av BET-teori för några av de i kapitel 5.3 redovisade isotermerna.

Eftersom det kan anses vara möjligt, att någon viss punkt på isotermer motsvarar fullbordandet av det första molekylskiktet, skulle en enkel metod att bestämma specifika ytan kunna vara att avläsa

denna mängd adsorbat och därefter endast använda ekvation (6.1). Brunauer och Emmett (1935) antog först att skärningen med fukt-kvotsaxeln av förlängningen hos isotermens plana del (se punkt A i fig 41) skulle vara ett lämpligt värde. Senare har man emellertid funnit, att den punkt där isotermen avviker nedåt från den rätta linjen (punkt B i fig 41) bättre motsvarar den monomolekylära kapaciteten. Denna empiriska metod ger tillfredsställande överensstämmelse med t ex BET-metoden för material, som har ett skarpt "knä" och därmed väldefinierad B-punkt.

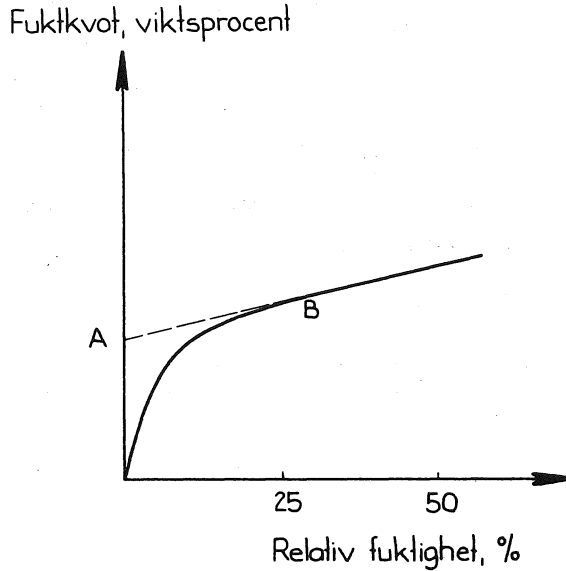


FIG 41 Isotherm som visar "punkt A" och "punkt B".
Isotherm showing "point A" and "point B".

6.2 Beräkning av specifika ytor med BET-teori

6.2.1 Metodik

BET-ekvationen (4.8) kan med god precision användas för beräkning av specifika ytor genom anpassning till absorptionsisotermens nedre del. Omskrivning av ekvationen till följande form underlättar den praktiska hanteringen

$$\frac{\phi}{x(1-\phi)} = \frac{1}{x_m C} + \frac{(C-1)\phi}{x_m C} \quad (6.2)$$

där ϕ = relativa fuktigheten, $0 \leq \phi \leq 1$

x = fuktkvoten, kg/kg

x_m = monomolekylära kapaciteten, kg/kg

C = mått på adsorptionsvärdet för det monomolekylära skiktet (se kapitel 4.3)

Ekvation (6.2) är en rät linje om man avsätter $\frac{\phi}{x(1-\phi)}$ som funktion av ϕ . Linjen har interseptet $a = \frac{1}{x_m C}$ och lutningen $b = \frac{C-1}{x_m C}$.

De två obekanta storheterna erhålls då med hjälp av

$$x_m = \frac{1}{a + b} \quad (6.3)$$

$$C = \frac{b}{a} + 1 \quad (6.4)$$

Beräkning av specifika ytan enligt ekvation (6.1) kräver emellertid även kännedom om A_m . Gregg och Sing (1967) anger följande uttryck för beräkning av A_m

$$A_m = 1,091 \left(\frac{M}{\rho_w N} \right)^{2/3} \cdot 10^{22} \quad (6.5)$$

där ρ_w = vattnets densitet, kg/m^3

Med $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

$M = 18 \text{ kg/kmol}$

$N = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ molekyler/kmol}$

fås $A_m = 10,6 \text{ \AA}^2$.

Insättning i (6.1) ger

$$S = \frac{3,54 \cdot 10^3}{a + b}, \text{ m}^2/\text{g} \quad (6.6)$$

Ekvation (6.4) samt ekvation (4.9) med $k = 1$ ger

$$Q_1 = RT \ln \frac{b}{a} + L \quad (6.7)$$

där Q_1 = adsorptionsvärmets för det första molekylskiktet, J/kmol

R = gaskonstanten, J/kmol °K

T = absoluta temperaturen, °K

L = kondensationsvärmets, J/kmol

Med R = 8314 J/kmol °K

T = 293 °K

L = $44 \cdot 10^6$ J/kmol vid +20°C

erhålls

$$Q_1 = (2,44 \ln \frac{b}{a} + 44) \cdot 10^6, \text{ J/kmol} \quad (6.8)$$

6.2.2 Resultat

Specifika ytor har beräknats för ett urval av de material, för vilka isotermer återfinns i bilaga I. $\frac{\phi}{x(1-\phi)}$ har beräknats och avsatts som funktion av ϕ i ett diagram (se fig II:1-14 i bilaga II). En rät linje har anpassats till punkterna. Man finner härvid, att BET-teorin förmår beskriva absorptionsisotermerna upp till ca 30 % RF. Observera att vid relativa fuktigheter över ca 30 % ger BET-teorin för höga fuktkvoter, detta trots att teorin endast beskriver adsorption.

Linjens skärning med ordinatan ger konstanten a och linjens lutning konstanten b. Insättning av dessa värden i ekvationerna (6.6) och (6.8) ger de resultat som redovisas i tabell 1.

Värdena för nettoadsorptionsvärme, bestämda med BET-teori, anses allmänt vara något osäkra.

TABELL 1. Specifika ytor, S och nettoadsorptionsvärme för några porösa byggnadsmaterial med isotermer enligt bil II.

Material	Isoterm enl fig i bil II	S m ² /g	Q ₁ -L J/kmol
Betong (C=320 kg/m ³ , vct=0,48 w _n /C=0,20)	4	28	6,7·10 ⁶
" (C=306 kg/m ³ , vct=0,58 w _n /C=0,16)	5	24	6,3·10 ⁶
" (C=284 kg/m ³ , vct=0,65 w _n /C=0,24)	6	42	7,2·10 ⁶
Porballastbetong (C=270 kg/m ³ , vct=0,46, w _n /C=0,23)	12	72	8,7·10 ⁶
Asbestcement, 1880 kg/m ³	16	132	8,1·10 ⁶
Kalksandsten, 1800 kg/m ³	21	47	6,4·10 ⁶
Gasbetong, 510 "	22	88	5,8·10 ⁶
" 230 "	26	90	5,8·10 ⁶
Tegel, 1890 "	29	7,9	5,8·10 ⁶
" 2100 "	30	5,2	4,3·10 ⁶
Glasull, 18 "	32	24	6,2·10 ⁶
Stenull, 42 "	33	14	10·10 ⁶
Gran, 420 "	38	242	4,3·10 ⁶
Träfiberski- va, hård 1100 "	45	229	4,2·10 ⁶

7 BESTÄMMNING AV PORSTORLEKSFÖRDELNINGAR

7.1 Allmänt

Hålrummen i ett poröst byggnadsmaterial har vanligtvis högst varierande utseende och storlek. Begreppet "porradie" har ingen direkt fysikalisk motsvarighet utan är mera en statistisk storhet. En grovt förenklad modell, där materialets hålrum liknas vid cylindriska rör med varierande radie, har emellertid visat sig användbar. Med hjälp av denna modell och kännedom om desorptionsisotermen kan en porstorleksfördelning för ett material beräknas. Porstorleksfördelningar för området upp till ca 1000 Å kan härvid bestämmas. Möjligheterna är även begränsade nedåt, och i stort kan man anse att fördelningar går att bestämma för porer i det s k "mellanliggande" området (20-1000 Å).

Kelvin-ekvationen (med randvinkeln, $\theta=0$):

$$\ln \frac{p}{p_s} = - \frac{\gamma_w V_w^2}{RT} \quad (7.1)$$

där p/p_s = relativa fuktigheten

γ_w = ytspänningen för fritt vatten

V_w = specifika volymen för vatten

R = gaskonstanten

T = absoluta temperaturen

r = porradien

ger ett samband mellan porradien och den relativa fuktighet, vid vilken alla porer med denna radie töms under ett desorptionsförlopp. Vid tömningen kommer emellertid ett adsorberat skikt att lämnas kvar på porväggarna. Hänsyn måste tas till detta skikt vid beräkning av porstorleksfördelningar med hjälp av Kelvin-ekvationen. Sambandet mellan den verkliga porradien, r_p och Kelvin-radien, r_k blir därför

$$r_p = r_k + t \quad (7.2)$$

där t = det adsorberade skiktets tjocklek vid viss relativ fuktighet.

Skiktets tjocklek kan beräknas med hjälp av

$$t = \left(\frac{x_a}{x_m} \right) \cdot \sigma = n\sigma \quad (7.3)$$

där x_a = den andel av fuktkvoten som binds till materialet genom adsorption

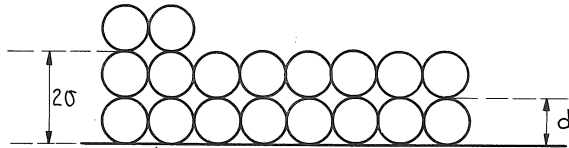
x_m = fuktkvoten vid första skiktets fullbordan

σ = tjockleken i medeltal hos ett skikt

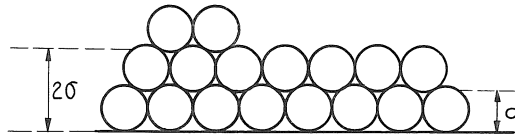
n = antalet adsorberade skikt

σ -värdet är inte nödvändigtvis detsamma som molekyl diametern.

Olika packning av molekylerna på materialytan har föreslagits (se fig 42). Shull (1948) anser emellertid att bästa resultat erhålls med molekylerna ordnade som i fig 42a. σ är alltså lika med molekyl diametern, som för vatten är ca 3,5 Å.



a)



b)

FIG 42 Packning av adsorberade molekyler i molekylära skikt. (a) AAA-packning, där varje molekyl i ett skikt är rakt ovanför grannmolekylen i det undre skiktet. (b) ABC-(hexagonal) eller ABAB-(kubisk) packning, där varje molekyl i ett skikt är nedsänkt mellan tre molekyler i det undre skiktet.

Packing of adsorbed molecules in molecular layers. (a) AAA-packing, where each molecule in a layer is vertically above its neighbour in the previous layer. (b) ABC-(hexagonal) or ABAB-(cubic) packing, where each molecule in a layer sits in the depression between three molecules in the previous layer.

x_m kan med nästan ööverträffad precision beräknas med hjälp av BET-teorin. x_a/x_m kan emellertid inte beräknas med BET-teori. Som framgår av kapitlet ovan är BET-teorin endast användbar upp till ca 30 % RF. Vid höga relativa fuktigheter ger teorin adsorberade fuktkvoter som överstiger de totala, trots att hänsyn inte tagits till kapillärkondensationen.

Med utgångspunkt från den sk Halsey-ekvationen föreslås istället följande uttryck:

$$t = \sigma \left(\frac{k}{\ln p_s/p} \right)^{1/3} \quad (7.4)$$

där $k = \ln p_s/p_m$

p_m/p_s = den relativa fuktighet, som ges av fuktkvoten x_m i absorptionsisotermen för materialet ifråga

x_m beräknas med hjälp av BET-teori.

De formler som presenterats ovan, erbjuder trots uppenbara begränsningar, i stort sett den enda möjligheten att beräkna porstorleksfördelningar i det s k "mellanliggande" området. Invecklade beräkningsteorier med förfinade metoder har uppställts (se t ex Barratt et al (1951)), men med åtskilliga förenklade antaganden är det tveksamt om man kan vinna något påtagligt härmed. Nedan redovisas och används en enklare beräkningsmodell efter Gregg och Sing (1967).

De flesta porstorleksfördelningar har bestämts med hjälp av isotemer med kväve som adsorbat. Av samma skäl som framförts beträffande beräkning av specifika ytor, bör porstorleksfördelningar för byggnadsmaterial även kunna beräknas för isotemer med vatten som adsorbat.

7.2 Beräkning av porstorleksfördelningar

7.2.1 Beräkningsmodell

När relativa fuktigheten sjunker från p_1/p_s till p_2/p_s under en desorptionsprocess, töms vissa porer till följd av två olika mekanismer:

1. Kapillärkondenserad vätska avdunstar från den "inre kapillären" som har radien r_k och vars värde ligger mellan r_{k1} och r_{k2} , vilka beräknas med hjälp av ekvation (7.1) genom insättning av p_1/p_s resp p_2/p_s .
2. Minskning av det adsorberade skiktets tjocklek från t_1 till t_2 hos de porer som tidigare förlorat kapillärkondensat. Dessa porer har radien $r \geq r_{k1} + t_1$. Tjocklekarna t_1 och t_2 bestäms med hjälp av ekvation (7.4) och BET-teorin som ger x_m .

Tömningsprocessen kan matematiskt beskrivas med sambandet:

$$V_p - V = \int_{r_p}^{\infty} \pi (r - t)^2 L(r) dr \quad (7.5)$$

där V_p = totala porvolymen

V = absorberade volymen vatten vid en relativ fuktighet, vid vilken alla porer med en radie mindre än r_p är fyllda

$L(r)dr$ = totala längden av de porer, vilkas radie faller mellan r och $(r+dr)$

Fördelningsfunktionen $L(r)$ är okänd. Flera förslag har framförts, men senare beräkningsmetoder använder sig av numerisk integration.

Med $\gamma_w = 0,073$ N/m vid $+20^\circ\text{C}$

$$V_w = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$R = 8314 \text{ J/kmol } ^\circ\text{K}$$

$$T = 293 \text{ } ^\circ\text{K}$$

erhålls med hjälp av ekvation (7.1)

$$r_k = \frac{10,8}{\ln p_s/p} \text{ \AA} \quad (7,6)$$

Volymen av de porer som har radier mellan r_{p1} och r_{p2} (ΔV_p) bestäms av

$$\Delta V_p = \Delta V_k \left(\frac{\bar{r}_p}{\bar{r}_k} \right)^2 \quad (7.7)$$

där \bar{r}_p = medelradien mellan r_{p1} och r_{p2} , \AA

\bar{r}_k = medelradien mellan r_{k1} och r_{k2} , \AA

ΔV_k = volymen hos den "inre cylindern", m^3/m^3

$$\Delta V_k = \Delta V - \Delta V_f \quad (7.8)$$

där ΔV = totala avdunstade volymen vatten vid ändring av relativa fuktigheten från p_1/p_s till p_2/p_s , m^3/m^3

ΔV_f = avdunstade volymen vatten till följd av minskat adsorberat skikt, m^3/m^3

$$\Delta V_f = \Delta t \Sigma (\Delta S_p) \cdot \rho_m \cdot 10^{-7} \quad (7.9)$$

där $\Delta t = t_1 - t_2$, A

$\Sigma (\Delta S_p)$ = ytan hos de porer som har radier större än eller lika med r_{p1} , m^2/g

ρ_m = materialets densitet, kg/m^3

ΔS_p = ytan hos de porer som har volymen ΔV_p

$$\Delta S_p = 2 \cdot \frac{\Delta V_p}{\bar{r}_p \cdot \rho_m} \cdot 10^7 \quad (7.10)$$

7.2.2 Resultat

Med hjälp av den ovan redovisade beräkningsmodellen har porstorleksfördelningar beräknats för

1. Betong med isoterm enligt fig I:6
2. Gasbetong " " fig I:22
3. Tegel " " fig I:29
4. Gran " " fig I:38

Dessa har valts för att ge prov på olika porstorleksfördelningar. Beräkningsarbetet är, om det utförs för hand, tämligen tidsödande.

I kapitlet ovan har specifika ytan beräknats för samtliga dessa material. Figurerna i bil II och isotermerna för materialen gör det möjligt att beräkna konstanten k i ekvation (7.4) (se tabell 2).

TABELL 2 Beräkning av konstanten k i ekvation (7.4)

Material	x_m kg/kg	p_m/p_s	k
Betong	0,012	0,18	1,72
Gasbetong	0,025	0,23	1,31
Tegel	0,0022	0,23	1,31
Gran	0,0685	0,30	1,20

Gasbetongsorten och tegelsorten har samma K-värde, vilket är högst rimligt, då de har samma adsorptionsvärme för det första molekylskiktet.

Som illustration av beräkningsgången visar tabell 3 beräkningarna för gasbetongen med $\rho_m = 510 \text{ kg/m}^3$ och $V_p = 0,785 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Volymen V vid respektive relativa fuktighet fås ur isotermen i fig I:22. Radien r_k beräknas med hjälp av (7.6) och tjockleken t erhålls ur (7.4). ΔV_f , som beräknas med hjälp av (7.9), kräver ett startvärde hos $\Sigma(\Delta S_p)$. Här har ansatts $2 \text{ m}^2/\text{g}$, vilket betyder att bidraget till specifik ytan från de porer, vars radie är större än 1096 \AA , är $2 \text{ m}^2/\text{g}$ av totalt $88 \text{ m}^2/\text{g}$ (se tabell 1). Sambandet (7.8) ger ΔV_k och ΔS_p erhålls ur (7.10).

Fig 43 visar porstorleksfördelningarna för de fyra materialen. De intressanta kurvorna diskuteras nedan.

Som framgår av sista kolumnen i tabell 3 erhålls även värden på specifik ytan för materialen. Dessa värden är emellertid betydligt osäkrare än de som erhålls med hjälp av BET-teorin. Man finner emellertid att för gasbetongen och betongen utgörs ca 98 % av totala specifik ytan av ytor hos porer med radier under ca 1000 \AA . För tegelsorten är emellertid endast ca 45 % att hänföra till porer med radier under ca 1000 \AA .

TABELL 3 Beräkning av porstorleksfördelning för gasbetong med isoterm enligt fig I:22.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
p/p_s	V_3/m^3	r_k/A^k	t/A	r/A^p	r/A^p	r_k/A^k	$\Delta t/A$	$\Delta V_3/m^3$	$\Delta V_f/m^3$	$\Delta V_3^k/m^3$	$\Delta V_3^p/m^3$	$\Delta S_3^p/m^2/g$	$\Sigma(\Delta S_p)/m^2/g$
0,99	0,110	1080	18,0	1096	823	808	3,7	0,009	0,0004	0,0086	0,0089	0,43	2,43
0,98	0,101	536	14,3	550	460	446	1,8	0,005	0,0002	0,0048	0,0051	0,40	2,83
0,97	0,096	356	12,5	369	322	311	1,3	0,005	0,0002	0,0048	0,0052	0,64	3,5
0,96	0,091	265	11,2	276	254	243	0,8	0,004	0,0001	0,0039	0,0043	0,7	4,2
0,95	0,087	221	10,4	231	197	187	1,1	0,009	0,0002	0,0088	0,0098	2,0	6,2
0,93	0,078	153	9,3	162	137	128	1,15	0,010	0,0004	0,0096	0,0111	3,2	9,4
0,90	0,068	103	8,15	111	93	85	1,15	0,013	0,0006	0,0124	0,0149	6,3	15,7
0,85	0,055	67	7,00	74,0	65	58	0,8	0,011	0,0006	0,0104	0,0131	7,9	23,6
0,80	0,044	49,0	6,20	55,2	49,5	43,5	0,4	0,007	0,0005	0,0065	0,0085	6,8	30,4
0,75	0,037	38,0	5,80	43,8	39,9	35	0,4	0,0045	0,0006	0,0039	0,0051	5,1	35,5
0,70	0,0325	30,5	5,40	35,9	31,0	26	0,6	0,0060	0,0011	0,0049	0,0070	8,9	44,4
0,60	0,0265	21,3	4,80	26,1	23,0	18,5	0,5	0,0035	0,0011	0,0024	0,0038	6,5	50,9
0,50	0,0230	15,7	4,30	20,0	17,9	13,8	0,35	0,0035	0,0009	0,0026	0,0044	9,7	60,6
0,40	0,0915	11,8	3,95	15,8	14,2	10,4	0,40	0,0030	0,0012	0,0018	0,0034	9,3	69,9
0,30	0,0165	9,0	3,55	12,6	11,1	7,7	0,30	0,0035	0,0011	0,0024	0,0050	17,7	87,6
0,20	0,0135	6,3	3,25	9,6									

$$\Delta V_p / \Delta r_p \times 10^{-6}, \text{ m}^2 / \text{m}^3$$

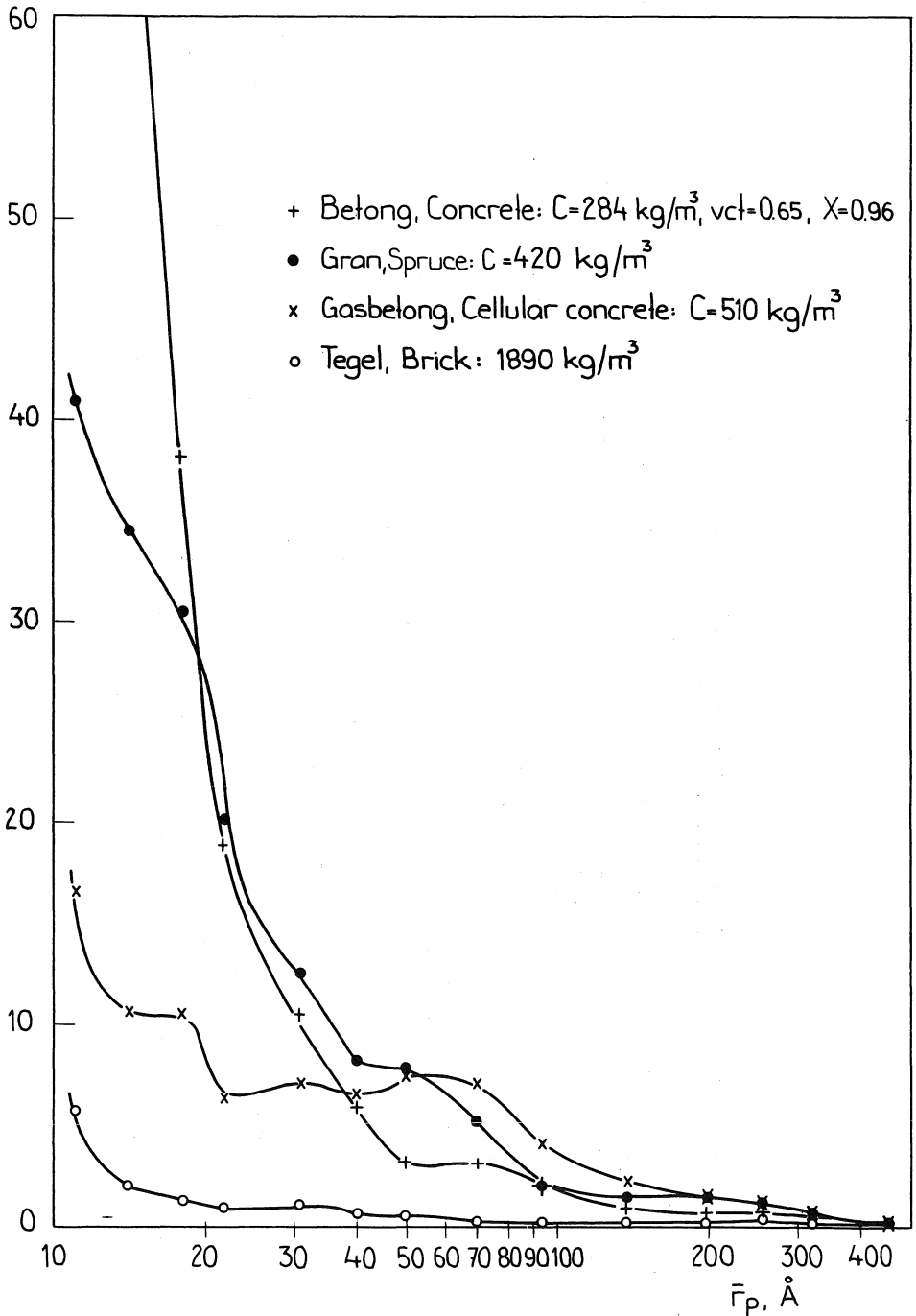


FIG 43 Porstorleksfördelningar för några material.
Pore-size distributions of some materials.

8 BERÄKNING AV ABSORPTIONSISOTERMER FÖR BETONG

8.1 Allmänt

Absorptions- och desorptionsisotermer kan beräknas för sammansatta material, om man känner de ingående komponenternas hygroskopiska egenskaper, och om dessa inte påverkar varandra så att egenskaperna ändras. För ett kompositmaterial bestående av n komponenter gäller

$$w_a^{\text{tot}} = \sum_n X_n \cdot w_a^n \quad (8.1)$$

där w_a^{tot} = den totala bundna vattenmängden

X_n = bråkdelen av komponenten n

w_a^n = den till komponenten n bundna vattenmängden

Denna formel har framför all visat sig användbar för beräkning av isotermer för olika betongtyper (se Bergström och Ahlgren (1969)). Betongen anses härvid bestå av två komponenter, cementpasta och ballast. Betong är ett av de fåtal material, för vilka man känner sammansättningen, och där de ingående beståndsdelarna inte reagerar med eller påverkar varandra.

För betong och även för en del andra cementbundna material får ekvationen (8.1) följande utseende

$$w_a^{\text{tot}} = X_p \cdot w_{ap} + X_b \cdot w_{ab} \quad (8.2)$$

där X_p = andelen cementpasta

w_{ap} = absorberad vattenmängd hos cementpastan

X_b = andelen ballast

w_{ab} = absorberad vattenmängd hos ballasten

Nedan presenteras en metod att beräkna det absorberade vattnet i cementpaster, som har härdats på ett normalt sätt. Kännedom krävs emellertid om den andra komponenten, ballasten. För vanliga svenska bergarter som granit, gnejs och diabas varierar porositeten mellan 0,3 och 1 volymprocent. Med dessa material som ballast, absorberas obetydliga vattenmängder i densamma. w_{ab} kan härvid anses vara noll. Med ett ex ett poröst stenmaterial som ballast kommer denna emellertid att absorbera vissa vattenmängder, som inte kan försummas. I detta senare fall måste man alltså känna till isotermer för ballasten för att kunna beräkna isotermer för betongen.

8.2 Beräkning av absorptionsisotermer för cementpastor

Beräkningsteorin som här presenteras baserar sig på Powers och Brownyards (1948) samt Czernins (1964) teorier om cementpastans fysikaliska egenskaper. För en mer ingående behandling hänvisas till Bergström (1967) samt Bergström och Ahlgren (1969).

Förutom själva cementgelen och det ohydratiserade cementet består cementpastan av gelporer, kontraktionsporer och kapillärporer. För beräkning av den volymmässiga fördelningen mellan dessa beståndsdelar kan man utgå från följande förutsättningar:

1. Vid fullständig hydrataation är $w_n/C = 0,25$ (w_n = icke-förångningsbart vatten och C = cementvikten).
2. Volymen av det kemiskt bundna vattnet w_n är 75 % av volymen hos fritt vatten.
3. Vikten gelvatten uppgår till 15 % av det hydratiserade cements vikt.
4. Volymen gelvatten är 90 % av volymen hos fritt vatten med samma vikt.
5. Vattenseparation beaktas ej.

Flera av de ovan angivna värdena kan diskuteras, men marginella förändringar av dessa påverkar måttligt noggrannheten hos beräkningsmetoden.

Av punkterna 1 och 3 framgår, att fullständig hydrataation ej kan uppnås vid vattencementtal (vct) $< 0,40$.

$$\text{Med } \alpha = \frac{w_n/C}{0,25} \quad (8.3)$$

erhålls för vct $\geq 0,40$ följande uttryck för ingående vattenmängder:

Vattenmängden i fyllda gelporer

$$w_g = 0,90 \cdot 0,15\alpha C = 0,135\alpha C \quad (8.4)$$

Vattenmängden i fyllda kontraktionsporer

$$w_k = 0,25w_n = 0,0625\alpha C \quad (8.5)$$

Vattenmängden i fyllda kapillärporer

$$w_c = w_o - 0,40\alpha C \quad (8.6)$$

där w_o = ursprunglig vattenmängd.

För $vct < 0,40$ fås om andelen av den maximalt möjliga hydratationsgraden är

$$\beta = \frac{\alpha}{2,5 vct} \quad (8.7)$$

$$w_g = 0,90 \cdot 0,15 \cdot 2,5 \beta w_o = 0,34 \beta w_o \quad (8.8)$$

$$w_k = 0,16 \beta w_o \quad (8.9)$$

$$w_c = w_o(1-\beta) \quad (8.10)$$

Gelporererna har en radie på maximalt ca 25 Å och bestämmer helt storleken av cementpastans specifika yta (se fig 43). Jämviktsfuktkvoten vid låga relativa fuktigheter kommer alltså att bestämmas av volymen gelporer. Kontraktionsporerna och kapillärporerna är något större och de flesta har en radie, som är mindre än ca 2000 Å. Dessa fylls alltså genom kapillärkondensation och vid 99-100 % RF är de flesta fyllda med vatten.

I området 0-45 % RF bestäms den absorberade fuktmängden i stort sett av storleken hos gelytan. Genom att ange den absorberade mängden i relation till gelytan ($\approx V_m$ = erforderlig vattenmängd per volymsenhet för ett molekyllager adsorbat) kan, som Powers och Brownyard visat, absorptionsisotermens nedre del ges i generell form oberoende av hydratationsgrad och vct. Vid högre relativa fuktigheter fås kapillärkondensationen och därmed vct och hydratationsgrad betydelse (se fig 44). Den lägsta av kurvorna i fig 44 kallas gelisoterm och representerar pastor, som helt saknar kapillärporer. En viss inverkan på gelisotermen har emellertid även kontraktionsporerna.

Enligt Powers och Brownyard kan V_m beräknas med hjälp av

$$V_m = k \cdot w_n \quad (8.11)$$

där k = konstant, vilken beror på cementets klinkerkomponenter,
 $0,24 \leq k \leq 0,28$

Med okänt cement sätts $k = 0,26$

w_n kan bestämmas experimentellt eller ur fig 45.

För relativa fuktigheter mellan 0-45 % kan nu w_{ap} beräknas med hjälp av ekvation (8.11) samt fig 44 och 45.

Eftersom samtliga porer i cementpastan är fyllda vid ca 100 % RF, kan den absorberade vattenmängden därför lätt beräknas i denna punkt:

$$w_{ap}^{100} = w_g + w_k + w_c = \begin{cases} C(vct-0,20\alpha); & vct \geq 0,40 \\ vct \cdot C(1-0,50\beta); & vct < 0,40 \end{cases} \quad (8.12)$$

I betong förekommer även luftblåsor. Storleken (>0,01 mm) är emellertid sådan att isotermen inte påverkas av dessa porer.

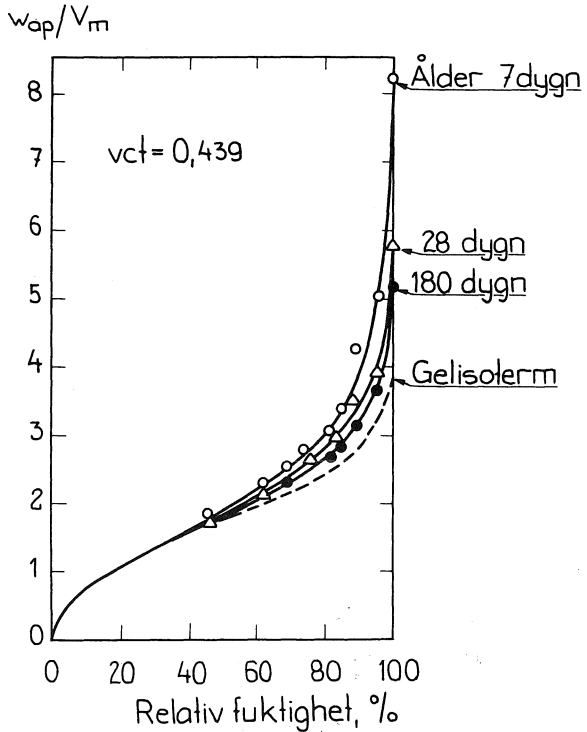


FIG 44 Exempel på absorptionsisoterm för cementpasta uttryckt i w_{ap}/V_m vid olika ålder enl. Powers och Brownyard (1948).
Examples of absorption isotherms of cement paste expressed in w_{ap}/V_m at different ages according to Powers and Brownyard (1948)

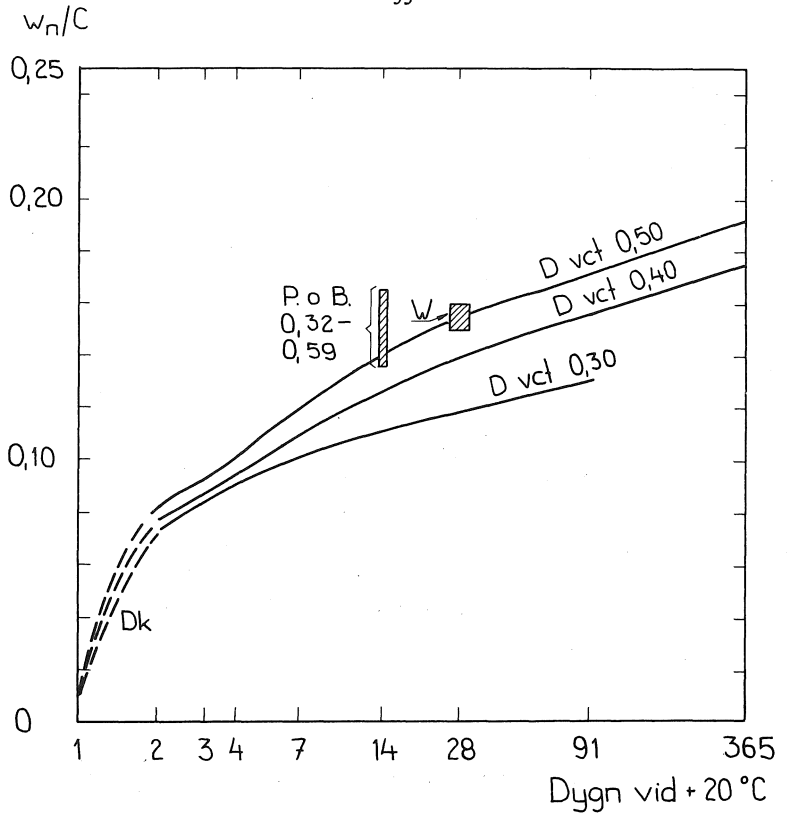


FIG 45 Utveckling av w_n/C enligt olika källor. Cementtyp: std. D=Danielsson; P¹¹o B=Powers och Brownyard, reducerat med 10 % enligt W; W=Warris; Dk=Dansk källa. Bergström (1967)

Evolution of w_n/C according to different sources. Type of cement: std.

D=Danielsson; P o B=Powers and Brownyard, reduced with 10 % according to W; W=Warris; Dk=Danish source. Bergström (1967).

Betydligt svårare är det att beräkna den absorberade mängden vid relativa fuktigheter mellan 45 och 100 %. Följande empiriska uttryck har emellertid visat sig väl beskriva fuktabsorptionen i den övre delen av det hygroskopiska området (45-98 % RF):

$$w_{ap} = k_1(\phi - 0,45)^3 + w_{ap}^{45} \quad (8.13)$$

$$\text{där } k_1 = 4 \cdot (w_{ap}^{100} - w_{ap}^{45})$$

ϕ = relativa fuktigheten, $0,45 \leq \phi \leq 0,98$

w_{ap}^{100} = absorberade vattenmängden vid 100 % RF enligt ekvation (8.12)

w_{ap}^{45} = absorberade vattenmängden vid 45 % RF beräknad enligt ovan.

Ekvation (8.13) har testats på samtliga av de för betong bestämda isotermer och avvikelserna har härvid varit mindre än 0,3 viktspocent.

8.3 Resultat

Absorptionsisotermer har beräknats för tre av de vanliga betongerna, vars isotermer redovisats i bilaga I. Fig 46, 47 och 48 motsvarar resp fig I:1, I:6 och I:7. k_1 -värdena i ekvation (8.13) är 428, 408 och 344 i de tre fallen.

Överensstämmelsen med försöksresultaten får anses vara mycket god. Man måste komma ihåg, att praktisk bestämning av fuktkvoter hos betong är svår att utföra med en noggrannhet som understiger 0,3-0,5 viktspocent.

Beräkning av isotermer för porballastbetongen i fig I:12 är inte intressant att redovisa, eftersom ballasten absorberar försumbart lite vatten (se fig I:31). Istället har absorptionsisotermer beräknats för en porballastbetong, hämtad ur Harmathy (1967). Resultatet framgår av fig 49. I samma figur återfinns även isotermer för den aktuella porballasten.

Fuktkvot, viktsprocent

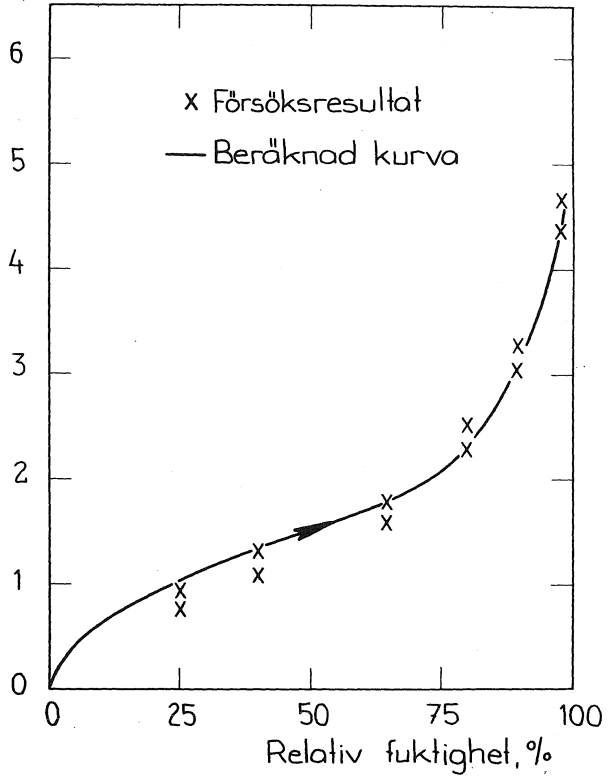


FIG 46 Beräkningsteorin jämförd med försöksresultat för betong med isotherm enligt fig I:1.

The theory of calculation compared with experimental results of concrete with isotherm in accordance with fig I:1.

$C=502 \text{ kg/m}^3$, $v_{ct}=0,40$, $w_n/C=0,15$, $l_o=2 \%$.

Fuktkvot, viktprocent

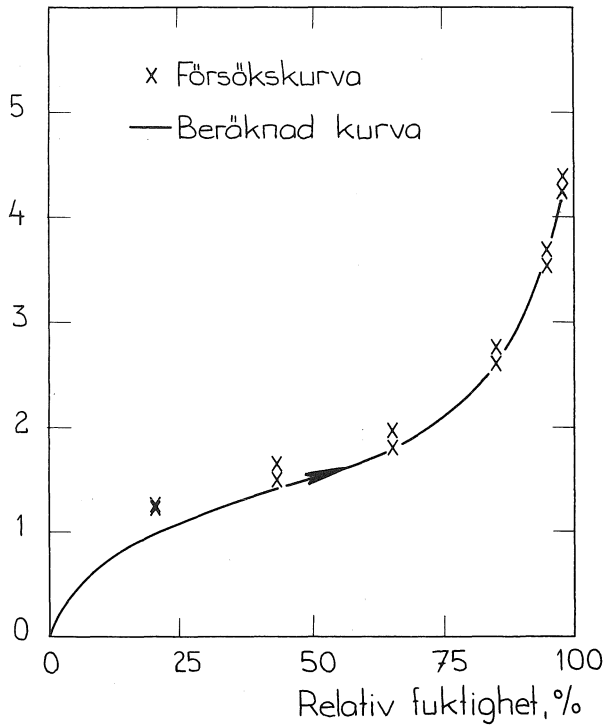


FIG 47 Beräkningsteorin jämförd med försöksresultat för betong med isoterm enligt fig I:6.

The theory of calculation compared with experimental results of concrete with isotherm in accordance with fig I:6.

$C=284 \text{ kg/m}^3$, $vct=0,65$, $w_n/C=0,24$, $l_o=3 \%$.

Fuktkvot, viktsprocent

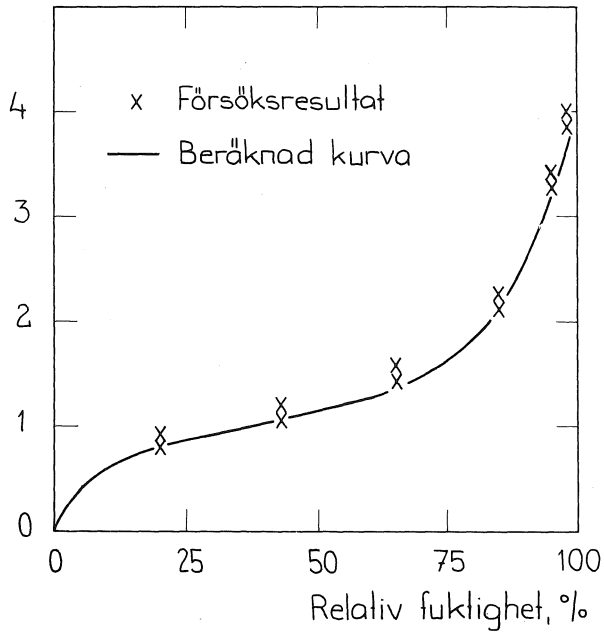


FIG 48 Beräkningsteorin jämförd med försöksresultat för betong med isotherm enligt fig I:7.

The theory of calculation compared with experimental results of concrete with isotherm in accordance with fig I:7.

$C=237 \text{ kg/m}^3$, $v_{ct}=0,66$, $w_n/C=0,24$, $l_0=6 \%$.

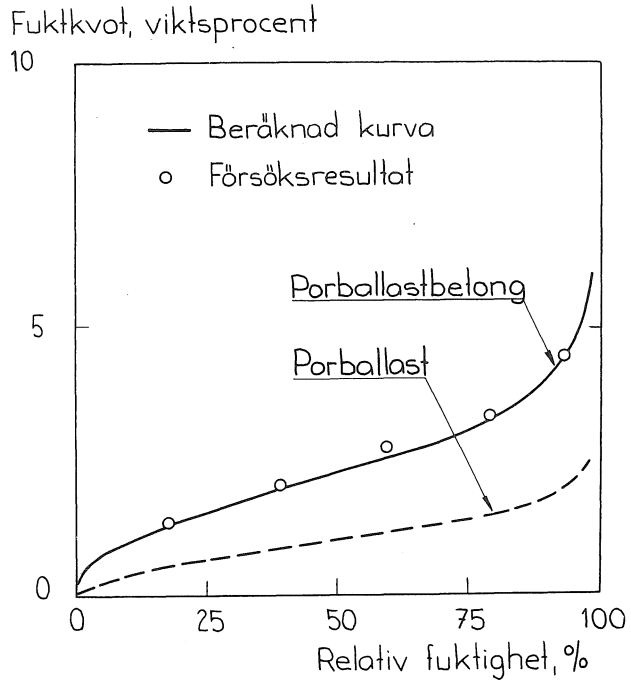


FIG 49 Beräkningsteorin jämförd med försöksresultat för porballastbetong enligt Harmathy (1967). Porballastens absorptionsisoterm framgår av streckad kurva.

The theory of calculation compared with experimental results of light-weight concrete according to Harmathy (1967).

Absorption isotherm of porous aggregate is apparent from line of short dashes.

$$C = 170 \text{ kg/m}^3, \text{ vct} = 0,50, w_n/C = 0,22.$$

9 DISKUSSION AV RESULTAT

9.1 Allmänt

I stort sett samtliga av de bestämda isotermerna för porösa byggnadsmaterial uppvisar ett utseende, som överensstämmer med typ II-isotermer i den av Brunauer, Emmett och Teller (1938) utförda klassificeringen (se fig 18). Två material, nämligen kalkstenen i fig I:36 och plastmattan i fig I:54, har typ III-isotermer. Enligt den ursprungliga klassificeringen skulle porösa material ha isotermer av typ IV och V. Dessa isotermer är emellertid horisontella vid relativa fuktigheter strax under 100 %, vilket betyder att samtliga porer är fyllda med vatten. För byggnadsmaterialen gäller dock, att inom det hyroskopiska området är endast en del av porerna fyllda med vatten.

Hur stor andel av materialets porer som är fyllda och isotermens utseende för materialet i fråga bestäms av porernas storlek. Har materialet en stor andel porer med radie under ca 1000 Å, kommer den hyroskopiska fukten att utgöra en stor del av det maximalt möjliga fukttinnehållet i materialet. Betong och asbestcement utgör exempel på material, där en mycket stor del av porsystemet är fyllt med vatten vid 98 % RF. Tegel och då framför allt hårdbränt tegel kan stå som exempel på material där fina porer saknas, och där det hyroskopiska vattnet fyller en liten del av porvolymen.

Har materialet stor mängd mycket fina porer, kommer materialets specifika yta att bli stor. Förhållandevis stor mängd vatten kommer härvid att bindas till materialen genom adsorption redan vid låga relativa fuktigheter. De material, som har stor andel cementpasta, utgör exempel härpå. Fig 43 visar den stora andelen fina porer hos en betongkvalitet. Som framgår av tabell 1 har även trä och träbaserade material stor specifik yta och många fina porer (se fig 43).

De något grövre porerna spelar en viss roll vid högre relativa fuktigheter, då kapillärkondensationen får betydelse. De ånghärdade kalciumsilikatmaterialen uppvisar t ex jämfört med betong mera brant stigande isotermer vid höga relativa fuktigheter. Fig 43 visar att gasbetong har flera porer än betong med radier över ca 40 Å. Denna förskjutning av porstorleksfördelningen mot något grövre porer gör att kapillärkondensationen får proportionellt större betydelse. Även tegelmaterialen uppvisar en markant fukt-

kvotsökning vid mycket höga relativa fuktigheter, varvid en del av de förhållandevis grova porerna börjar fyllas och isotermer stiger brant.

Samtliga material uppvisar hysteresis, fibermaterialen i ringa omfattning och framför allt de ånghärdade silikatmaterialen i större omfattning. Detta mycket viktiga förhållande har inte tillräckligt beaktats. Jämviktsfuktkvoten vid desorption kan i många fall överstiga jämviktsfuktkvoten vid absorption med över 100 %, för gasbetongprodukterna till och med ca 200 % vid relativa fuktigheter över 90 %.

Man kan naturligtvis ställa sig tveksam till om de bestämda jämviktsfuktkvoterna utgör verkliga sluttillstånd. Absorptionskurvan skulle i så fall höjas upp, och desorptionskurvan sänkas ned. Vägningen av materialproven har emellertid alltid visat, att materialen varit i jämvikt. Vidare bör det faktum, att samtliga material uppvisar hysteresis bidra till att styrka riktigheten hos de bestämda isotermerna. Vid varje försök har nämligen ett stort antal, helt olika material testats. Samtliga material har fått stå i det aktuella klimatet tills alla kommit till ett jämvikts-tillstånd. Detta betyder, att flertalet material varit i ett klimat betydligt längre än vad som egentligen skulle vara nödvändigt. De material som bestämt tiden, till dess samtliga material kommit i jämvikt, har varit trämaterialen, och dessa uppvisar den minsta hysteresisen.

En förutsättning för att dessa desorptionsisotermer kunnat bestämmas har varit klimatutrustningens stora stabilitet. Redan mycket små variationer hos temperatur eller relativ fuktighet kan åstadkomma stora minskningar av jämviktsfuktkvoten. Om ett material har porer, som har smala öppningar eller porer som är cylindriska, är en liten sänkning av relativa fuktigheten tillräcklig, för att en stor porvolym skall tömmas och aldrig mer fyllas, även om luftfuktigheten återigen ökar över det aktuella medelvärdet (se 4.2.2).

Hysteresisen är som påpekats i avsnitt 4.2.2 i första hand ett resultat av olika förutsättningar vid kapillärkondensation. Material som har förhållandevis många porer, vars radier ligger i området mellan 100 och 1000 Å, uppvisar stor hysteresis vid höga relativa fuktigheter. Detta gäller för gasbetong, kalksandsten och tegel. De cementbundna materialen med i stort sett normala

härdningsförhållanden har sin porstorleksfördelning förskjuten mot mindre storlekar. Hysteresisen blir därför förhållandevis stor redan vid ca 40 % RF. Vid 98 % RF är däremot hysteresisen obetydlig för betong.

Hysteresis har även erhållits i viss utsträckning under 25-50 % RF, då kapillärkondensationen borde sakna betydelse (se avsnitt 3.3.2). En förklaring utgör förmodligen närvaron av främmande molekyler, som reducerar den adsorberade vattenmängden.

I några fall har s k scanning-kurvor studerats. De resultat som erhållits visar för de här undersökta materialen, att vid avbruten absorption följt av desorption får scanning-kurvorna det utseende som framgår av fig 50. Vid avbruten desorption följt av absorption ser scanning-kurvorna i stort sett ut som i fig 51. Tveksamhet föreligger om kurvorna ansluter sig helt till absorptionskurvan och i så fall hur snabbt. Gasbetong med stor hysteresis vid höga relativa fuktigheter har en scanning-kurva, som inte ansluter sig till absorptionsisotermer.

De erhållna resultaten är vad gäller desorptionsisotermerna svåra att kontrollera, därför att tidigare resultat i stort sett saknas. Johansson och Persson (1946) samt Tveit (1966) har bestämt absorptionsisotemer för ett stort antal material. Isotemer för cementbundna material förekommer tyvärr sparsamt. Beträffande de övriga materialen är överensstämmelsen god och några påtagliga avvikelser förekommer ej. Trämaterialet är något bättre representerade i litteraturen. Seifert (1972) har redovisat även desorptionsisotemer och överensstämmelsen härmed är utmärkt.

9.2 Cementbundna material

Till de cementbundna materialen räknas här betong, cementbruk, porballastbetong och asbestcementprodukterna. För samtliga dessa material bestäms jämviktsfuktkvoterna av mängden vatten i cementpastan. Betongerna och cementbruken innehåller praktiskt taget icke-porös ballast, vilken inte binder något vatten. De fuktmängder som binds av lättklinkerkornen (se fig 1:31) och av asbestfibrerna är även försumbara. Cellulosafibrerna, som blandats med asbestfibrerna i materialet i fig 1:18, har naturligtvis haft en viss betydelse för fuktfixeringen.

Fuktkvot, viktsprocent

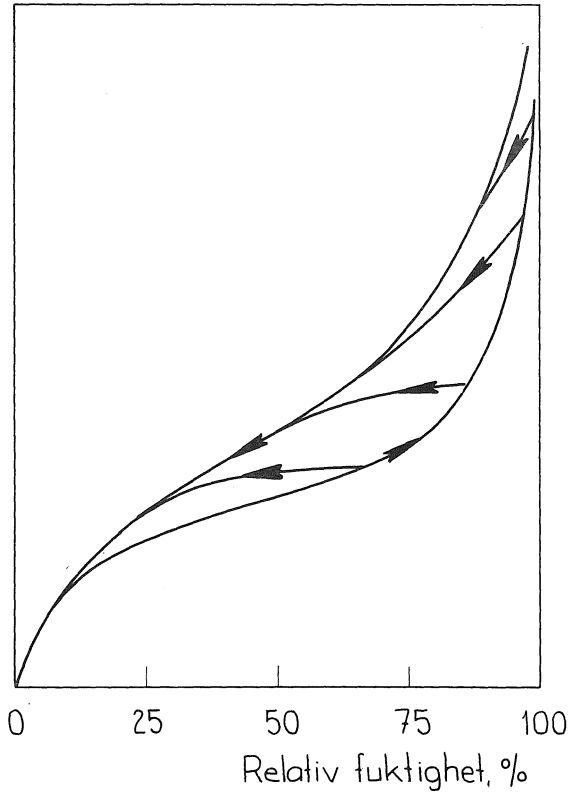


FIG 50 Scanning-kurvornas principiella utseende för flertalet byggnadsmaterial vid avbruten absorption följt av desorption.

Fundamental look of scanning curves for most of the building materials at broken absorption followed by desorption.

Fuktkvot, viktsprocent

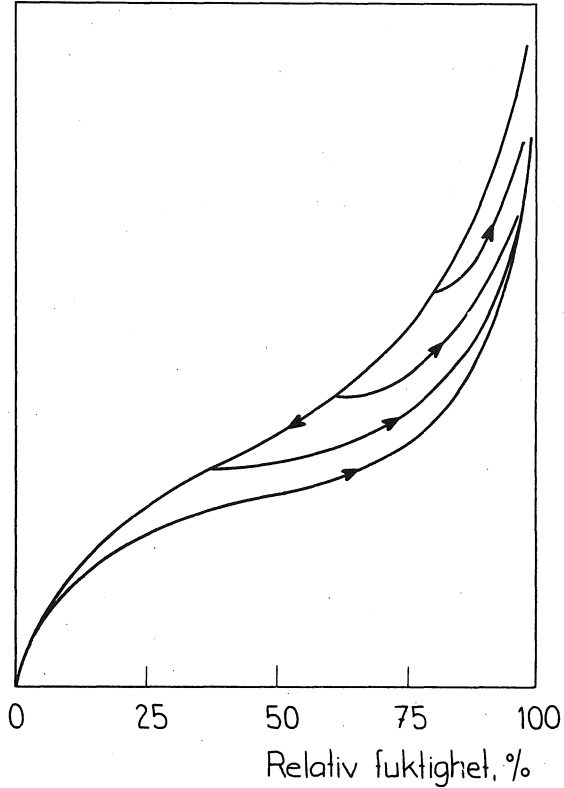


FIG 51 Scanning-kurvornas principiella utseende för flertalet byggnadsmaterial vid avbruten desorption följt av absorption.

Fundamental look of scanning curves for most of the building materials at broken desorption followed by absorption.

Mängden cementpasta är här mindre än i övriga asbestcementprodukter, vilket ger lägre fuktkvoter vid låga relativa fuktigheter. Trots detta är fuktkvoterna vid 98 % RF lika stora som för de andra produkterna.

Cementpastan i de olika materialen är inte likvärdig. Den betydelsefullaste skillnaden är att materialen i fig I:13-18 utsatts för en viss ånghärdning, dock inte under övertryck. Detta resulterar i en viss förgrovning av porerna samt en minskning av specifika ytan. Ånghärdningen resulterar vidare, enligt Powers och Brownyard (1948), i en ökning av adsorptionsvärmnet. Detta kan eventuellt även utläsas ur tabell 1. Ökningen av adsorptionsvärmnet motverkar minskningen av specifik yta, vad gäller adsorptionen av fukt vid låga relativa fuktigheter.

I kapitel 8 har en metod presenterats för beräkning av absorptionsisotermer för betong härdad under normala förhållanden. Denna beräkningsmodell baserar sig på Powers och Brownyards teorier om cementpastans fysikaliska egenskaper. Även om Powers och Brownyards pormodell kan kritiseras, beskriver den på ett utmärkt sätt cementpastans uppbyggnad. Mikrostrukturens huvudbeståndsdel är kalciumsilikathydrät, som utgöres av några hundra Å långa mycket tunna blad, som i många fall är rullade till tuber. I denna kolloidala massa finns grövre men fortfarande mycket tunna kalciumhydroxidkristaller, ohydratiserat cement och en del andra metalloxidföreningar. Den kolloidala massan och de kristallina partiklarna bildar cementgelen. Denna gel har mycket stor specifik yta och en mycket fin porstruktur. Dessa gelporer utgör 28 % av cementpastans volym. Betydligt grövre porer bildas av det vatten som finns i cementpastan, och som inte reagerar med cementet vid hydratiseringen. Dessa porer kallas kapillärporer. Vid vattnets reaktion med cement uppstår sk kontraktionsporer, därför att vattnets specifika volym endast är ca 75 % av volymen hos fritt vatten. Utöver dessa porer tillkommer i betong luftporer, som är avsevärt mycket större och som inte påverkar betongens hygroskopiska egenskaper. Betongen i fig I:7 innehåller ca 6 % luftporer. Fig 48 visar emellertid, att beräkningsmetoden i kapitel 8 ger lika god överensstämmelse för denna betong som för betong med endast 2 % luftporer.

Jämfört med många andra material fylls en stor del av porvolymen hos betong inom det hygroskopiska området. Vid 98 % RF är por-

fyllnadsgraden ca 70 % för materialet i fig I:6 och ca 55 % för materialet i fig I:7.

Betongen i fig I:6 kan således innehålla så mycket vatten, redan i det hygroskopiska området, att dess frostbeständighet äventyras.

Som framgått av ovanstående diskussion kan fuktfixeringen i betong variera avsevärt beroende på betongens sammansättning och härdningsgrad. Inverkan av olika faktorer kan illustreras med absorptionsisotermer, beräknade med hjälp av teorin i kapitel 8. Fig 52 visar inverkan av cementhalten med vattencementtalet och hydratationsgraden konstanta. Jämviktsfuktkvotens ökning med cementhalten beror helt enkelt på att andelen cementpasta ökar. Effekten av ökande vattencementtal framgår av fig 53. Jämviktsfuktkvotens ökning vid låga relativa fuktigheter beror på att mängden ballast minskar i den färska blandningen på bekostnad av en ökande vattenhalt. Vid höga relativa fuktigheter beror ökningen på att kapillärporositeten ökar med ökande vattencementtal. Fig 54 visar inverkan av varierande mängd kemiskt bundet vatten. Ju längre den kemiska reaktionen mellan vatten och cement har framskridit desto större gelporositet och desto mindre kapillärporositet.

Specifika ytan ökar alltså och därmed den adsorberade fuktmängden. Eftersom kapillärporositeten minskar, så minskar det kapillärkondenserade fukttinnehållet, vilket ger minskade jämviktsfuktkvoter vid höga relativa fuktigheter.

Specifika ytan för cementpasta kan beräknas med hjälp av värdena för betongerna i tabell 1. Vid 96 % hydratationsgrad är cementpastans specifika yta $257 \text{ m}^2/\text{g}$, medan den endast är $147 \text{ m}^2/\text{g}$ vid 64 % hydratationsgrad.

I tabell 1 finner man även, att adsorptionsvärdet för det första molekylskiktet ökar med ökande hydratationsgrad.

För de flesta av de cementbundna materialen finner man, att hysteresisen är störst mellan 60 och 90 % RF, och att absorptions- och desorptionsisotermerna går ihop, då de närmar sig 100 % RF. Detta gäller framför allt för de icke ånghärdade produkterna. Man måste därför ha en vad gäller storleken klart avgränsad familj av porer med maximal radie på ca 1000 \AA , som fylls vid 98-100 % RF både vid absorption och desorption. Detta förhållande styrker ytterligare den ovan redovisade modellen beträffande porerna i

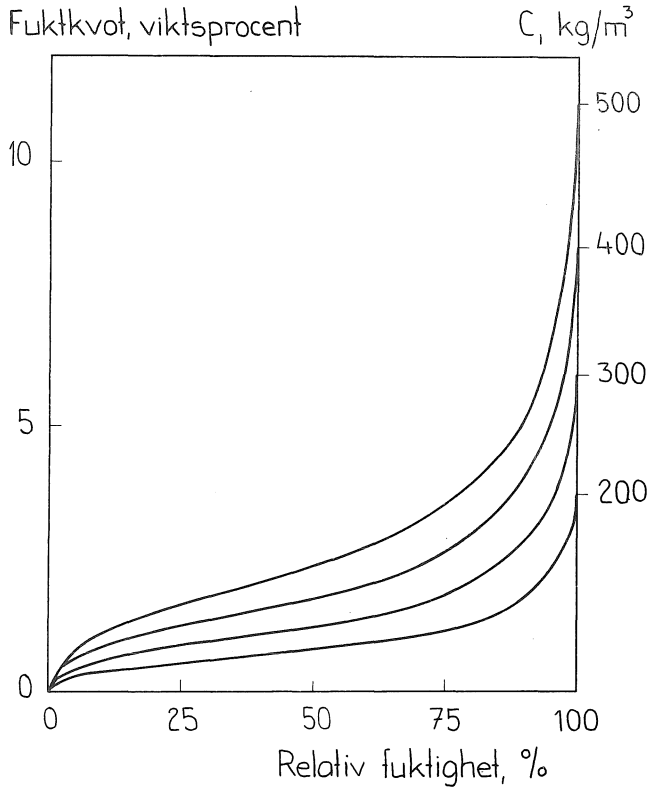


FIG 52 Betong med varierande cementshalt och konstant; $v_{ct} = 0,60$ och $w_n = 0,20$.

Concrete with varying cement content (C) and constant $v_{ct} = 0,60$ and $w_n/C = 0,20$.
Bergström and Ahlgren (1989).

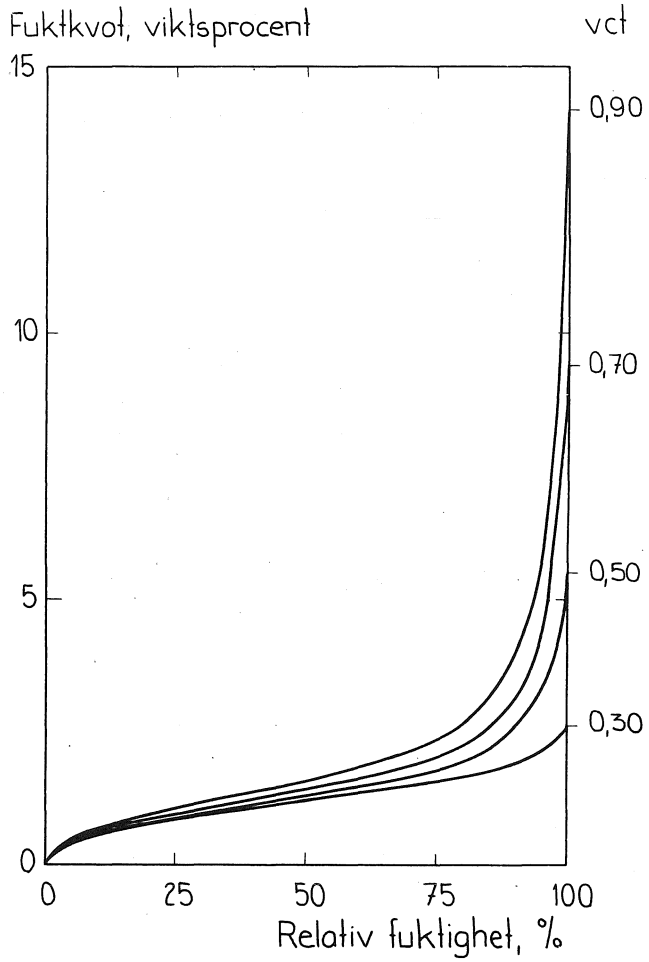


FIG 53 Betong med varierande vct och konstant;
 $C = 350 \text{ kg/m}^3$ och $w_n/C = 0,18$.
Concrete with varying vct and constant
 $C = 350 \text{ kg/m}^3$ and $w_n/C = 0,18$.
Bergström and Ahlgren (1969).

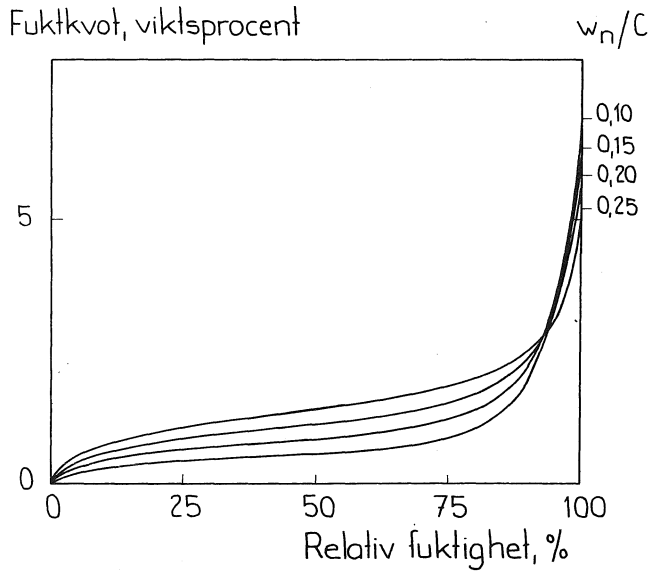


FIG 54 Betong med varierande hydrationsgrad och konstant; $w_{ct} = 0,60$ och $C = 300 \text{ kg/m}^3$.
Concrete with varying degree of hydration and constant $w_{ct} = 0,60$ and $C = 300 \text{ kg/m}^3$.
Bergström and Ahlgren (1969).

cementpasta.

Intressant är även antydningen till ett språng hos desorptionskurvan vid relativa fuktigheter mellan 30 och 40 %. Tyvärr föreligger osäkerhet beträffande dess utseende, beroende på att det är något för glest mellan försöksvärdena i detta intervall. Ett liknande språng har emellertid redovisats av bl a Mossman (1957) samt Feldman och Sereda (1968). Förekomsten av detsamma är även fullt rimligt, då cementpastan innehåller ett stort antal porer med radier på 12-15 Å, som är tubformade och som plötsligt måste tömmas (se avsnitt 4.2.2).

9.3 Högtrycksånghärdade material

Till denna grupp av material kan räknas kalksandstenprodukterna med isotermer enligt fig I:19-21 och de olika typerna högtrycksånghärdad gasbetong med isotermer enligt fig I:22-26. Dessa båda materialslag har i stort sett samma mikrostruktur, trots att en av gasbetongtyperna har cement i stället för kalk i grundmassan. Strukturen är även i stort sett densamma som i betong. En viktig del av strukturen utgörs även här av kalciumsilikathydrater. Högtrycksånghärdningen gör emellertid, att porsystemet förgrövas jämfört med cementpastans porsystem (se fig 43). Specifika ytan blir även härigenom mindre än cementpastans. Dessa olikheter resulterar i de skillnader beträffande isotermernas utseende som redan påpekats.

De stora luftblåsorna i gasbetongprodukterna är utan betydelse för fuktfixeringen. Det hygroskopiska vattnet sitter i cellväggarna, vilka har samma struktur och uppbyggnad som kalksandstenprodukterna. Antar man att cellväggarna är fyllda med vatten vid 99 % RF och desorption, så finner man för gasbetongen i fig I:22, som med säkerhet inte innehåller kalk, att porositeten hos cellväggarna är 11 volymprocent. Detta medför, att densiteten hos själva cellväggen i gasbetongen är ca 1700 kg/m^3 , vilket är i stort sett detsamma som för kalksandsten. Kalksandstenprodukterna innehåller även en del mindre stenar, som ökar densiteten något.

Alla materialen uppvisar mycket stor hysteresis vid höga relativa fuktigheter. Detta beror framför allt på många porer med radier i området 100-1000 Å, men även porernas utseende måste ha betydelse.

Kurvorna påminner till viss del om dem som ger typ D-hysteresis (se fig 25). Typ D-hysteresis erhålls av parallella plattor (se fig 27) med varierande avstånd och icke-parallella plattor (se fig 29). Det är därför sannolikt, att kalciumsilikatkristallerna, som utgörs av tunna blad, bildar en mikrostruktur som i de båda figurerna ovan.

9.4 Keramiska material

Tegelprodukterna med isotermer enligt fig I:27-30 och lättklinkerkornen med isoterm enligt fig I:31 tillhör denna grupp. Tegelmaterialet utgör prov på olika bränningsgrader och därmed helt olika öppna porositeter. Den öppna porositeten varierar mellan 40 och 14 volymsprocent. I de hårt brända produkterna har framför allt de förhållandevis små porerna försvunnit. Dessa porer är emellertid ändå för stora för att hygroskopisk fukt skall bindas till materialet i någon större utsträckning. Specifika ytan är mycket liten, och först vid mycket höga relativa fuktigheter sker en viss kapillärkondensation.

Det lösbrända teglet i fig I.27, vars porositet i stort sett är helt öppen erhåller, vid 98 % RF en porfyllnadsgrad på endast ca 5 %. För det hårdbrända teglet i fig I.30 blir porfyllnadsgraden ca 10 % vid 98 % RF.

Intressant är att tegelmaterialet uppvisar en viss hydratisering eller kemisorption, som är av samma storleksordning som den fysikaliska fuktfixeringen.

9.5 Trä och träbaserade material

Förutsom de i rubriken nämnda materialen har till denna grupp förts de båda materialen jute och kork.

Den hygroskopiska fukt som finns i ett trämaterial binds till materialet i dess cellväggar.

Vattnet sitter i fibrilbuntarna mellan fibrilerna och i fibrilerna mellan kristalliterna, som är uppbyggda av cellulosamolekyler. Porerna eller kanalerna mellan fibrilerna har en storlek på mellan 100-500 Å. Radien hos porerna mellan kristalliterna är ca 5-50Å (jfr fig 43).

Fuktkvot, viktsprocent

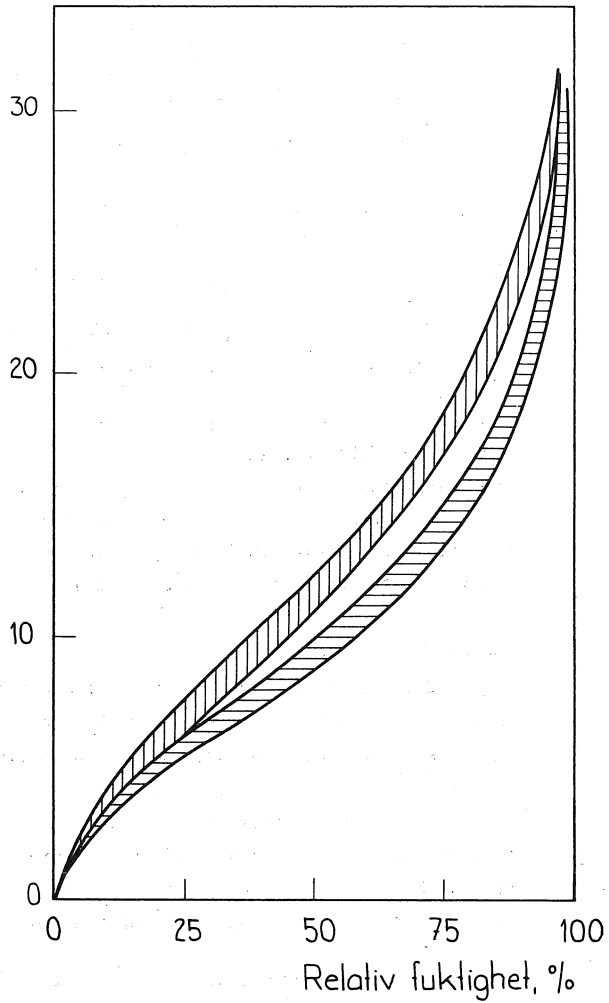


FIG 55 Isotermernas spridningsområden för furu, gran, björk och bok.

The distribution areas of the isotherms for pine, spruce, birch and beech.

Som framgår av tabell 1 är specifika ytan för trämaterialen mycket stor, och adsorptionen blir därför stor. Porerna är emellertid även sådana, att kapillärkondensation förekommer i betydande omfattning.

Strukturen hos de olika träslagen är i stort sett identisk, och alla binder ungefär lika mycket vatten (se fig 55).

Hysteresisen är liten jämfört med vad andra material uppvisar. Detta torde bero på de avlånga porerna mellan kriställiterna är spetsiga i ändarna och kan därmed anses vara V-formade. De tubformade porerna mellan fibrilerna har en triangulär genomskärningsyta och därmed är även dessa V-formade. Enligt avsnitt 4.2.2 erhålls inte någon hysteresis, då porerna är V-formade.

Vid ca 98 % RF är cellväggarna fyllda med vatten och absorptions- och desorptionsisotermen går ihop i en punkt (fibernätnadspunkten).

Vad som sagts om träslagen gäller i stort sett även för de träbaserade produkterna samt för juteväv och kork. Eventuellt kan specifika ytan minska något för de produkter, som framställs under viss uppvärmning. Den oljehärdade boarden får helt naturligt betydligt lägre jämviktsfuktkvoter. Dessa synpunkter överensstämmer med resultat erhållna av Lundgren (1967).

9.6 Diverse material

Fig I:32 och I:33 ger isotermerna för två mineralullsprodukter.

Vattnet binds till materialen huvudsakligen genom adsorption.

Vid mycket höga relativa fuktigheter kan en viss kapillärkondensation ske i korsningarna mellan fibrer. Stenullens lägre jämviktsfuktkvoter beror förmodligen på att förekomsten av kulor ökar vikten, utan att i motsvarande grad som fibrerna bidra till specifika ytan. Fibrerna har nämligen samma tjocklek. Glasfibrerna är visserligen längre, men detta har inte någon betydelse här.

Osäkerhet föreligger beträffande isotermerna för gips i fig I:34. Dessa kurvor är svåra att bestämma, inte minst vad gäller uttorkningsförfarandet, som på ett mycket påtagligt sätt kan inverka på kurvornas lägen.

Cellplasterna i fig I:50 och I:51 binder volymmässigt mycket små mängder vatten precis som de båda mineralullsprodukterna. Plastmattan i fig I:54 består inte av ren plast, utan inblandningar av t ex stenmjöl och trämjöl förekommer. Detta gäller även i hög grad för linoleummattan i fig I:53, som innehåller stora mängder trämjöl, vilket framgår av isotermernas utseende.

SAMMANFATTNING

Denna rapport behandlar fuktfixering i porösa byggnadsmaterial, vilka befinner sig i luft. Fysikalisk bindning av vatten till olika material har studerats vid varierande relativ fuktighet och temperatur. I begränsad omfattning behandlas även kemisk bindning av vatten.

Rapporten kan anses bestå av två delar. Den första delen utgör en sammanfattning och diskussion av teorier om bindning av gaser och ångor till material och då framför allt bindning av vattenångor till porösa material. I den andra delen redovisas bestämningar av jämviktsfuktkvoter för porösa byggnadsmaterial. Resultaten diskuteras och analyseras samt beräkningar görs med utgångspunkt från de erhållna resultaten.

I ett inledande kapitel behandlas vattenångans speciella egenskaper, vilka gör att den skiljer sig från de flesta andra adsorbat. Därefter diskuteras de olika formerna för vattenångans fixering till material. Ett särskilt kapitel ägnas åt sorptionsisotermer. Dess uppbyggnad, fenomen i samband med skillnaderna mellan absorption och desorption samt temperaturens inverkan på isotermerna diskuteras. Härvid framläggs en teori om temperaturberoendet.

En speciell klimatutrustning har konstruerats och byggts, där godtyckliga relativa fuktigheter och temperaturer kan erhållas med god noggrannhet i en testkammare. I denna utrustning har jämviktsfuktkvoter för byggnadsmaterial bestämts i området 20-98 % RF och vid temperaturen +20°C. Fullständiga absorptions- och desorptionsisotermer, vilka förekommer sparsamt i litteraturen, har bestämts. Även s k "scanning-kurvor" har bestämts. Sorptionsisotermer för mer än 50 byggnadsmaterial redovisas i en särskild bilaga.

Med hjälp av isotermerna har specifika ytor, bindingsenergier samt porstorleksfördelningar beräknats för några av materialen.

En metod för beräkning av absorptionsisotermer för cementbundna material redovisas. Metoden baserar sig på Powers och Brownyards teorier om cementpastans fysikaliska egenskaper och gäller för de material som härdats på ett normalt sätt.

I ett avslutande kapitel analyseras och jämförs sorptionsisotermerna för de olika materialen. Skillnaderna mellan absorptions- och de-

sorptionskurvorna diskuteras. Med utgångspunkt från de erhållna resultaten anges scanning-kurvornas ungefärliga förlopp mellan de båda **yterlighets**kurvorna. Isotermernas uppbyggnad diskuteras för de olika materialfamiljerna. För de vanligaste svenska träslagen visas hur såväl absorptions- som desorptionsisotermerna i stort sett sammanfaller.

SUMMARY

This report deals with moisture fixation in porous building materials, which are surrounded by air. Physical binding of water to different materials has been studied at varying relative humidity and temperature. Chemical binding of water is also dealt with, but in limited extent.

The report can be considered to consist of two parts. The first part constitutes a summary and a discussion of theories about binding of gases and vapour to materials and then above all binding of water vapour to porous materials.

Determinations of equilibrium moisture contents of porous building materials are described in the second part. The results are discussed and analysed and calculations are done with starting-point from obtained results.

In an introductory chapter the special properties of water vapour are dealt with. These properties separate it from most other adsorbates. After that different forms of fixation of water vapour to materials are discussed. In a special chapter the sorption isotherm is studied. Its construction, phenomena in connection with differences between absorption and desorption and the effect of temperature on the isotherms are discussed. In this connection a theory of the temperature dependence is submitted.

A special climate equipment has been constructed and built where arbitrary relative humidities and temperatures can be obtained with good accuracy in a test chamber. In this equipment equilibrium moisture contents have been determined for building materials in the range 20-98 % RH and at the temperature +20°C. Complete absorption and desorption isotherms, which occur sparingly in literature, have been determined. Even so-called scanning-curves have been determined. Sorption isotherms for more than 50 building materials are reported in a special appendix.

Specific surfaces, binding energies and pore-size distributions have been calculated for some of the materials by the aid of the isotherms.

A method for calculation of absorption isotherms of cement-bound materials is reported. The method is based upon Powers's and

Brownyard's theories about the physical properties of the cement-paste and is valid for the materials which have been hardened in a normal way.

In the last chapter the sorption isotherms of the different materials are analysed and compared. The differences between the absorption and desorption isotherms are discussed. With starting-point from the obtained results the approximate courses of the scanning-curves between the two extreme curves are stated.

The construction of isotherms is discussed for different families of materials. It is shown that for the most ordinary Swedish kinds of wood absorption isotherms as well as desorption isotherms coincide on the whole.

LITTERATURFÖRTECKNING

Adanson, B, Ahlgren, L, Bergström, S G och Nevander, L L: Byggnadstekniska fuktproblem. Programskrift 12, BFR, Stockholm 1970.

Ahlgren, L: Grundläggande lagar för fuktvandring i porösa byggnadsmaterial. Rapport nr 2, Byggnadsteknik, LTH, Lund 1966.

Amberg, C H and McIntosh, R: A study of adsorption hysteresis by means of length changes of a rod of porous glass. Canadian Journal of Chemistry, vol 30, 1952.

Amdur, E J and White R W: Two-pressure relative humidity standards. Humidity and moisture, vol 3. New York 1965.

Aristov, B G, Davydov, V, Karnaukhov, A P and Kiselev, A V: Theory of the particulate structure of adsorbents. Russian J. of Phys. Chem., Dec 1962.

Barrett, E P, Joyner, L G and Halenda, P P: The determination of pore volume and area distribution in porous substances. J. of Amer. Chem. Soc., 73, 1951.

Bazant, Z P: Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement past and concrete. Cement and Concrete Research, vol 2, 1972.

Berezin, R I, Kiselev, A V and Sinitsyn, V A: Heat capacity of the adsorption systems silica gel-water, benzene or n-hexane. Russian J. of Phys. Chem., Febr 1963.

Bergström, S G: Kompendium i byggnadsmateriallära, FK I. VBV, TLTH, Lund 1967.

Bergström, S G och Ahlgren, L: Beräkning av absorptionsisotermer för betong. Nordisk Betong, nr 2, 1969.

Bering, B P, Dubinin, M M and Serpinsky, V V: Theory of volume filling for vapour adsorption. J. Colloid and Interface Science, vol 2, 1966.

deBoer, J H: The shape of capillaries. The structure and properties of porous materials. London 1958.

Bomberg, M: Water flow through porous materials. Part I-III. Report 19-21, Byggnadsteknik, LTH, Lund 1971, 1972.

Broekhoff, J C: Adsorption and capillarity. Delft 1969.

Brunauer, S, Emmett, P H and Teller, E: Adsorption of gases in multimolecular layers. J. of Am. Chem. Soc., 60, 1938.

Brunauer, S: The adsorption of gases and vapors. Vol 1, Princeton 1943.

Brunauer, S, Odler, I and Yudenfreund, M: The new model of hardened Portland cement paste. 1970.

Brunauer, S and Copeland, L E: Physical adsorption of gases and vapors on solids. ASTM, Special Tech. Publ., 340, 1963.

Childs, E C: The effect of soil compression on the equilibrium of pore water. Rilem Bulletin 27, 1965.

Cohan, L H: Sorption hysteresis and the vapor pressure of concave surfaces. J. of Am. Chem. Soc., 60, 1938.

Cohan, L H: Hysteresis and capillary theory of adsorption of vapors. J. of Am. Chem. Soc., 66, 1944.

Derjaguin, B V: Opening lecture, Topic I. Transfers of water in porous media. Rilem Bulletin 27, 1965.

Derjaguin, B V and Zachavaeva, N: Physical properties of water and its mobility in fine pores. Rilem Bulletin 27, 1965.

Derjaguin, B V and Nerpin, S: Role of capillary and surface forces in moisture transfer in porous bodies. Rilem Bulletin 27, 1965.

Derjaguin, B V: Superdence water. Sc. Am., Nov 1970.

Dollimore, D and Heal, G R: Improved method for calculation of pore size distribution from adsorption data. J. Appl. Chem., vol 14, nr 3, Mar 1964.

Drost-Hansen: The puzzle of water. Int. Sc. and Tech., Oct 1966.

Dubinin, M M: Adsorption in micropores. J. Coll. and Interface Sc., vol 23, Apr 1967.

Englert, G and Wittmann, F: Water in hadened cement paste. Rilem Bulletin 6, 1968.

Englert, G, Wittmann, F and Nussbaum, M: Studium der Bindungsverhältnisse des Wassers im Zementstein. Zement-Kalk-Gips, nr 4, 1971.

Everett, D H: Some problems in the investigation of porosity by adsorption methods. The structure and properties of porous materials. London 1958.

Feldmann, R F and Sereda, P J: Moisture content - its significance and interaction in a porous body. Proc. Int. Symp. on Humidity, Washington DC. vol 4, 1963.

Feldmann, R F and Sereda, P J: A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption- length change and mechanical properties. Rilem Bulletin 6, 1968.

Gál, S: Die Methodik der Wasserdampf-Sorptionmessungen. Springer Verlag 1967.

Gause and Tucker: J. Res., NBS, vol 25, 1940.

Gregg, S J and Sing, K S: Adsorption, Surface area and porosity. London 1967.

Giles, C H: Adsorption. Chem. and Industry. nr18, May 1964.

Harmathy, T Z: Effect of moisture on the fire endurance of building elements. ASTM Spec. Tech. Publ., No 385, 1964.

Harmathy, T Z: Moisture sorption of building materials. National research council of Canada, Tech. paper no 242, 1967.

Honeyborne, D B, Cornell, J B and Arnold, L: A review of the preparation and properties of anomalous water. Materials and Structures, 21, 1971.

Hoory, S E and Prousnitz, J M: Monolayer adsorption of gas mixtures on homogenous and heterogenous solids. Chem. Eng. Science, vol 22, no 7, 1967.

Johansson, C H: Fuktighetens absorption och vandring i byggnadsmaterial. Teknisk Tidskrift, Okt 1944.

Johansson, C H och Persson, G: Fuktabsorptionskurvor för byggnadsmaterial. Byggnästaren, nr 17, 1946.

John, P T: Moisture adsorption in porous systems. Ind. J. Tech., vol 2, no 9, 1964.

John, P T: Similarity correlations between vapour pressure and adsorbed moisture in porous systems. Ind. J. Tech., vol 4, no 3, 1966.

Kadlec, O and Dubinin, M M: Comments on the limits of applicability of the mechanism of capillary condensation. J. of Coll. and Interf. Sc., vol 31, no 4, 1969.

Kollmann, T und Schneider, A: Einrichtung zur praxisnahen und wissenschaftlich exakten Messung von sorptionseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff, Bd 25, 1967.

Kollmann, F: über die Sorption von Holz und ihre exakte bestimmung. Holz als Roh- und Werkstoff, Bd 17, 1959.

Kraemer, E O: in A treatise on physical chemistry, edited by H S Taylor, New York 1931.

Krischer, O: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin 1963.

Kuzmak, J M: Moisture content - suction relationship. Proc. of Building Res. Conf. , Oct 1953.

Lundgren, S Å: Träskivor som byggnadsmaterial, del 1. Nyköping 1967.

Lück, W: Feuchtigkeit. Wien 1964.

Lykow, A W: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Berlin 1958.

Lykow, A W: Heat and mass transfer in capillary porous bodies. Oxford 1966.

Malmquist, L: Untersuchungen zur empirisch-mathematischen Analyse der Sorption von Wasserdampf durch Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, Bd 25, 1967.

McBain, J W: An explanation of hysteresis in the hydration and dehydration of gels. J. Am. Chem. Soc., 57, 1935.

Medena, J and Compagner, A: Simple method of determine cumulative surface area distribution of porous solids. J. Catalysis, vol 8, no 2, 1967.

Melrose, J C: Model calculations for capillary condensation. A.I.Ch.E. J., Sept 1966.

Mills, R H: Influence of water in areas of restricted adsorption on properties of concrete. Materials and Structures, 6, 1968.

Penner, E: Suction and its use as measure of moisture contents and potetials in porous materials. Humidity and moisture. New York 1965.

Powers, T C: A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. Highway Research Board, 1947.

Powers, T C and Brownyard, T L: Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. PCA, Bulletin 22, 1948.

Powers, T C: The thermodynamics of volume change and creep. Materials and Structures, 6, 1968.

Rao, K S: Hysteresis in sorption. J. Phys. Chem., 45, 1941.

Rounsley, RR: Multimolecular absorption equation. J. of Am. Inst. Chem. Eng., 7, 1961.

Schull, C G: The determination of pore size distribution from gas adsorption data. J. Am. Chem. Soc., 70, 1948.

Sereda, P J and Hütcheon, N B: Moisture equilibrium and migration in building materials. ASTM Special Tech. Publ., 385, 1965.

Simpson, W T: Equilibrium moisture content prediction for wood. Forest Prod. J., May 1971.

Splitzgerber, H und Wittmann, F: Sorptionsmessungen an erhärtetem Zementstein. Zement-Kalk-Gips, nr 10, 1966.

Tveit, A: Fukt og fukttransport i porøse materialer. Norges byggforskningsinstitutt, rapport 39, Oslo 1964.

Tveit, A: Measurement of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Statens institut för byggnadsforskning, rapport 8, Stockholm 1966.

Vos, B H and Tammes, E: Moisture and moisture transfer in porous materials. Report no BI-69-96, TNO, Delft 1969.

Wilkinson, G E and Klute, A: The temperature effect on the equilibrium energy status of water held by porous media. Soil Soc. Proc., 1962.

Winterkorn, H F: The bearing of soil - water interaction on water conduction under various energy potentials. Rilem Bulletin 27, 1965.

Wittmann, F: Surface tension, shrinkage and strength of hardened cement paste. Materials and Structures, 6, 1968.

Young, D M and Crowell, A D: Physical adsorption of gases. London 1962.

Zsigmondy, R Z: über die Struktur des Gels des Kieselsäure. Theorie der Entwässerung. Z. anorg. Chem., 356, 1911.

BILAGA I

ABSORPTIONS- OCH DESORPTIONSISOTERMER FÖR
PORÖSA BYGGNADSMATERIAL VID +20°C

Fuktkvot, viktsprocent

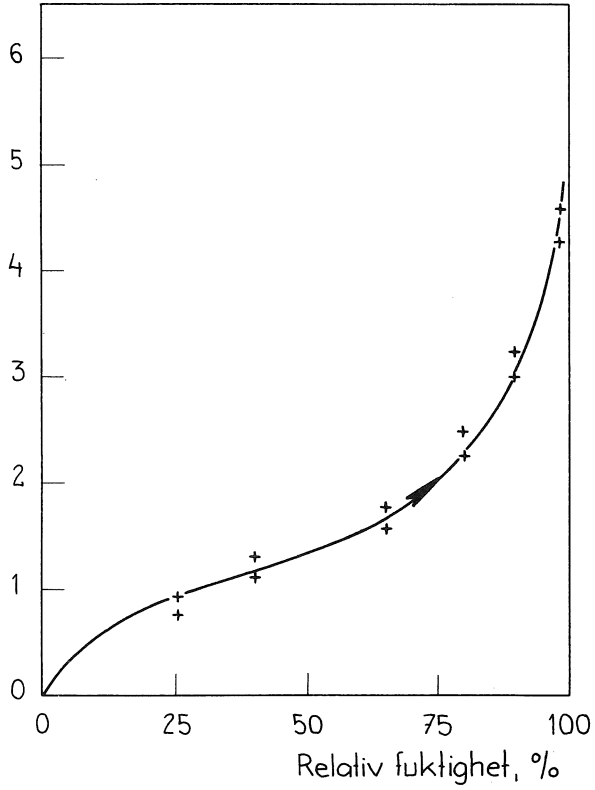


FIG I:1 Betong, concrete K 500 P; $C=502 \text{ kg/m}^3$, std;
 $v_{ct}=0,40$; $w_p/C=0,15$; $l_0=2$ %; max stenstorlek,
max size of stones=32 mm.

Fuktkvot, viktsprocent

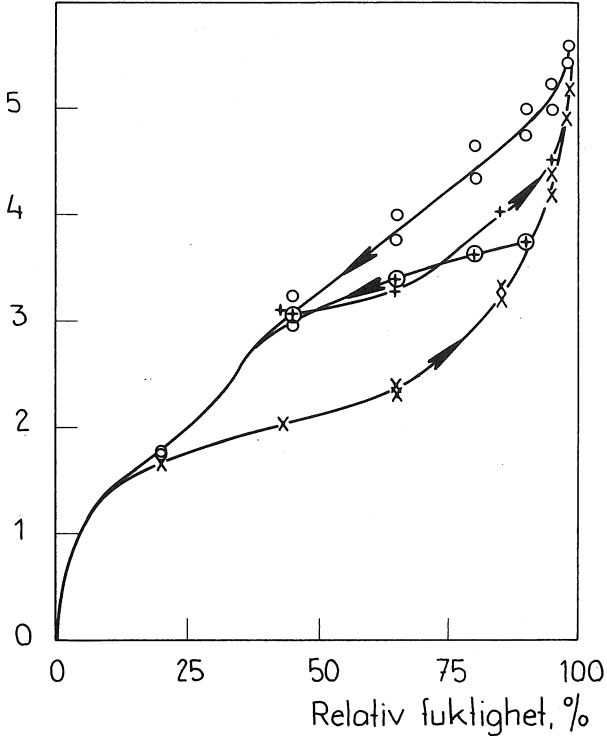


FIG I:2 betong, concrete; $C=400 \text{ kg/m}^3$, std; $v_{ct}=0,55$;
 $w_n/C=0,23$; $l_n=5,3 \%$; max stenstorlek, max
size of stones=32 mm.

Fuktkvot, viktsprocent

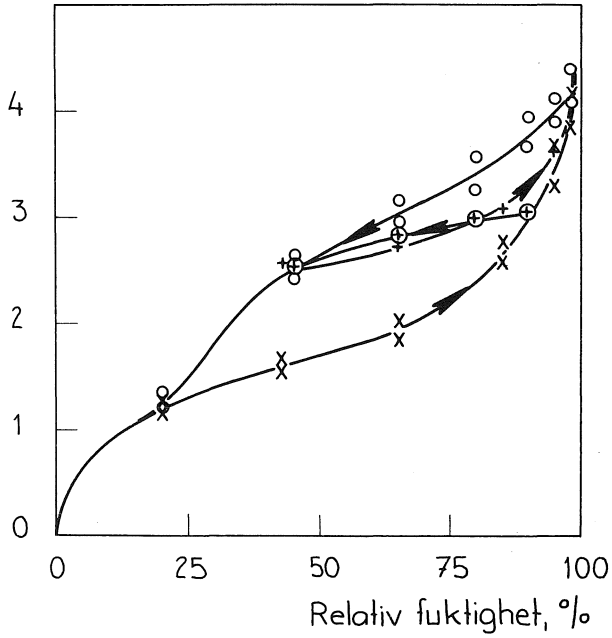


FIG I:3 Betong, concrete K 350 P; $C=334 \text{ kg/m}^3$, std;
vct=0,44; $w_p/C=0,24$; $l=4,3 \%$; max sten-
storlek, max size of Stones=32 mm.

Fuktkvot, viktprocent

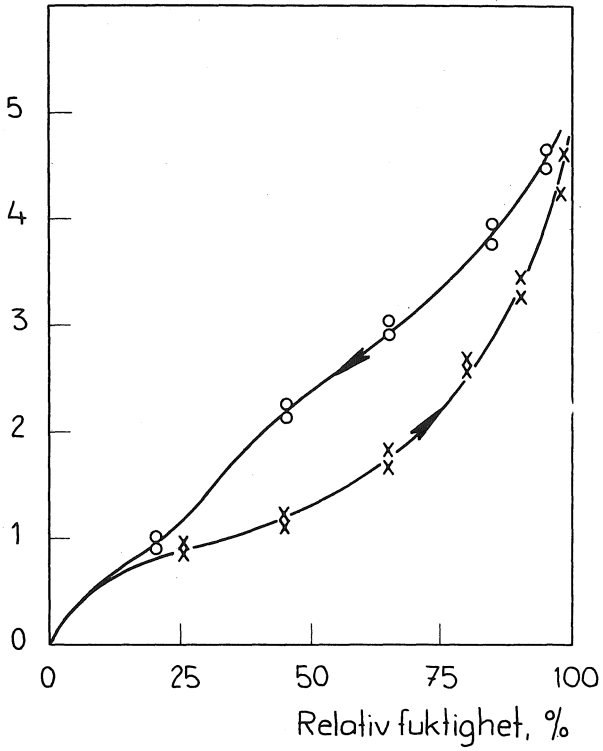


FIG I:4 Betong, concrete K 300 P; $C=320 \text{ kg/m}^3$, std; $v_{ct}=0,48$; $w_p/C=0,20$; $l=3,9 \%$; max stenstorlek, max size of stones=32mm.

Fuktkvot, viktsprocent

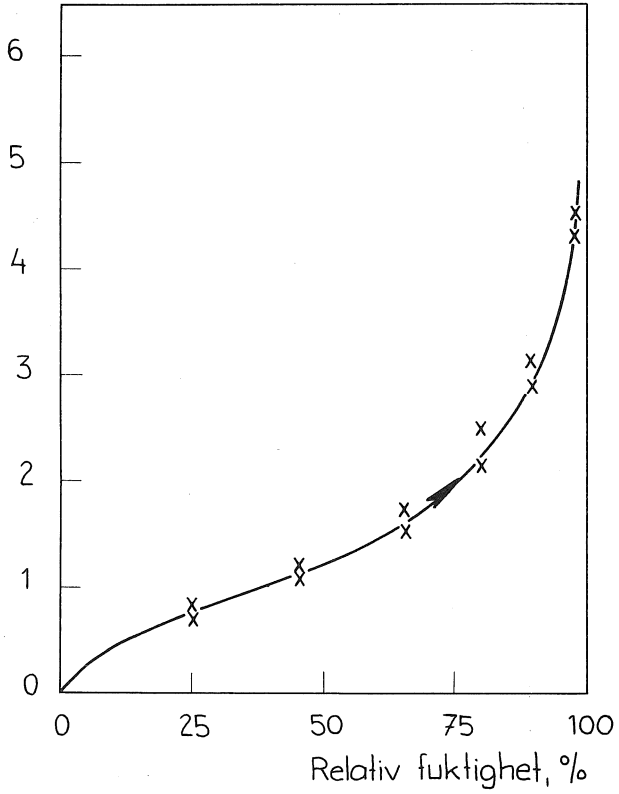


FIG I:5 Betong, concrete K 300 P; C=306 kg/m³, std;
vct=0,58; w_n/C=0,16; l₀=1,9 %; max stenstorlek,
max size of stones=32 mm.

Fuktkvot, viktspocent

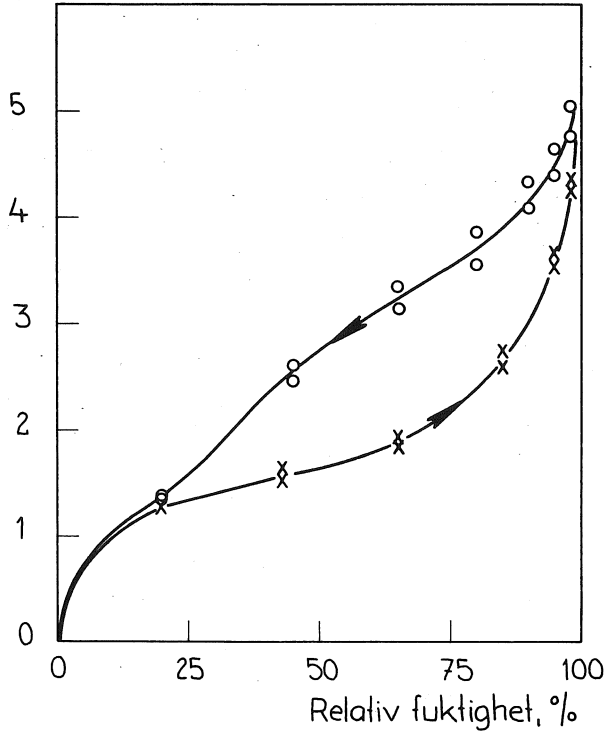


FIG I:6 Betong, concrete K 250 P; $C=284 \text{ kg/m}^3$, std; $v_{ct}=0,65$; $w_p/C=0,24$; $l_0=3,0 \%$; max stenstorlek, max size of stones=32 mm.

Fuktkvot, viktsprocent

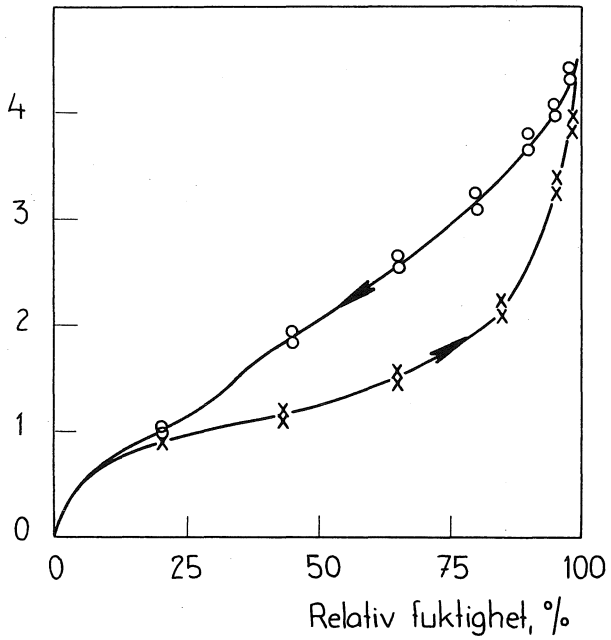


FIG I:7 Betong, concrete K 200 P; $C=237 \text{ kg/m}^3$, std; $v_{ct}=0,66$; $w_n/C=0,24$; $l_o=5,8 \%$; max stenstorlek, max size of stones=32 mm.

Fuktkvot, viktprocent

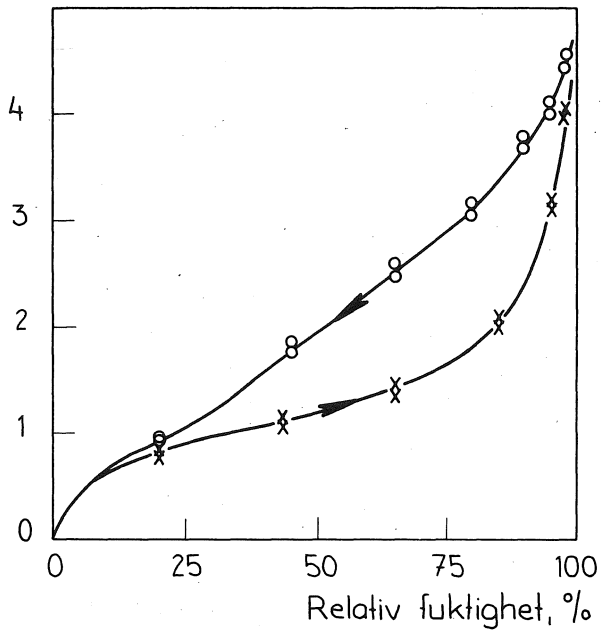


FIG I:8 - Betong, concrete K 150 P; C=220 kg/m³, std;
vct=0,72; w_a/C=0,24; l =4,5 %; max stenstorlek,
max size of stones=32 mm.

Fuktkvot, viktsprocent

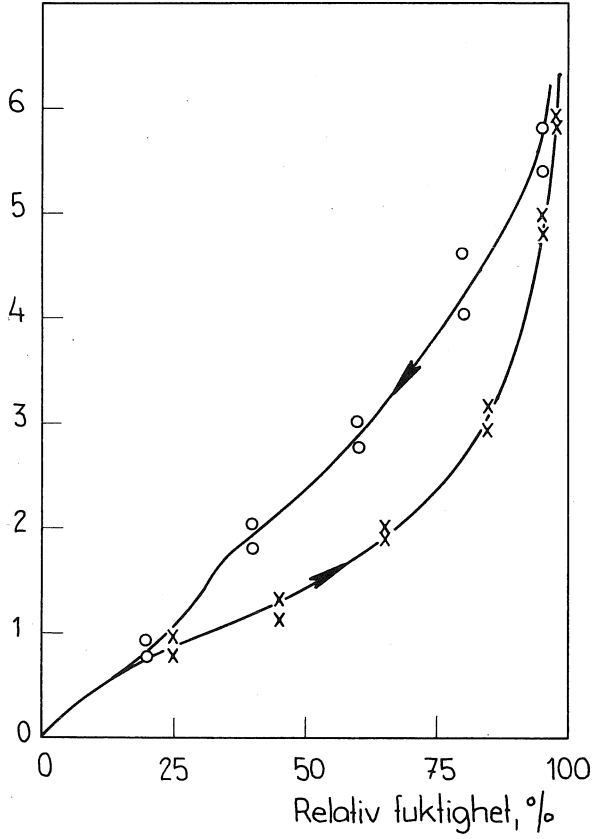


FIG I:9 Cementbruk, cement mortar 1:4; vct=0,80; porositet, porosity=22 %.

Fuktkvot, viktsprocent

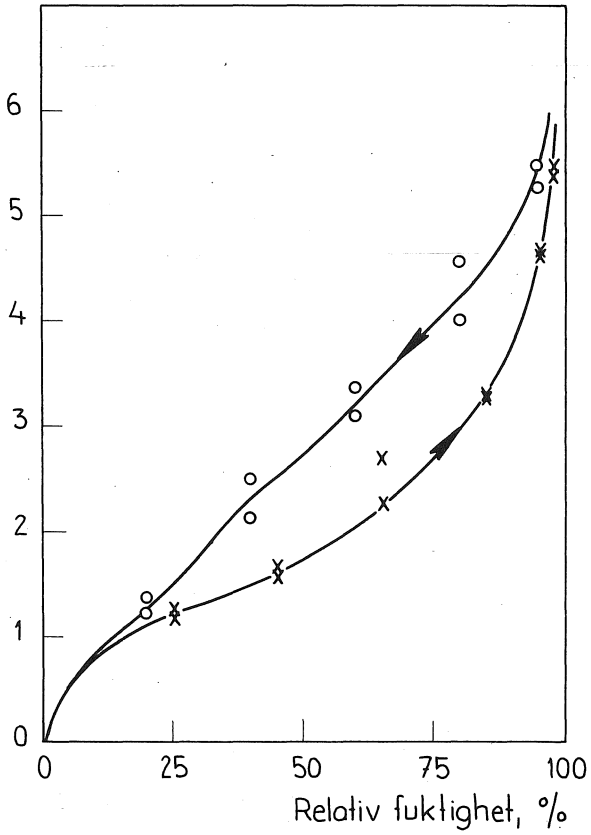


FIG I:10 Cementbruk, cement mortar 1:4; vct=0,70;
 $w_n/C=0,20$.

Fuktkvot, viktprocent

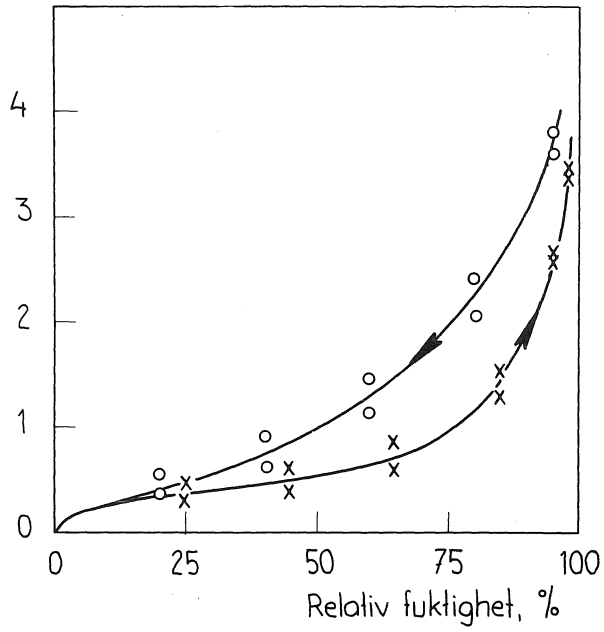


FIG I:11 Kalkcementbruk, lime-cement morter 35/65/550; porositet; porosity=31 %.

Fuktkvot, viktprocent

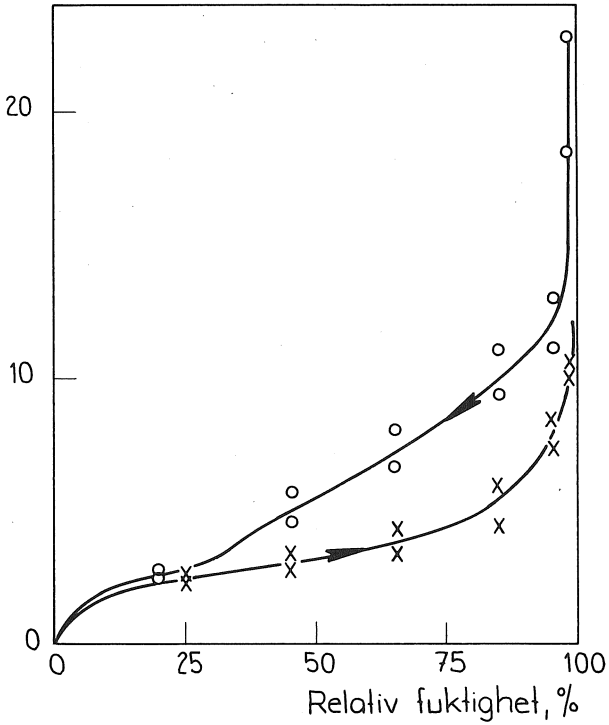


FIG I:12 Porballastbetong, light-weight concrete;
C=270 kg/m³, std; vct=0,46; w/C=0,23;
lättklinker, porous aggregate=210 kg/m³;
sand=120 kg/m³.

Fuktkvot, viktsprocent

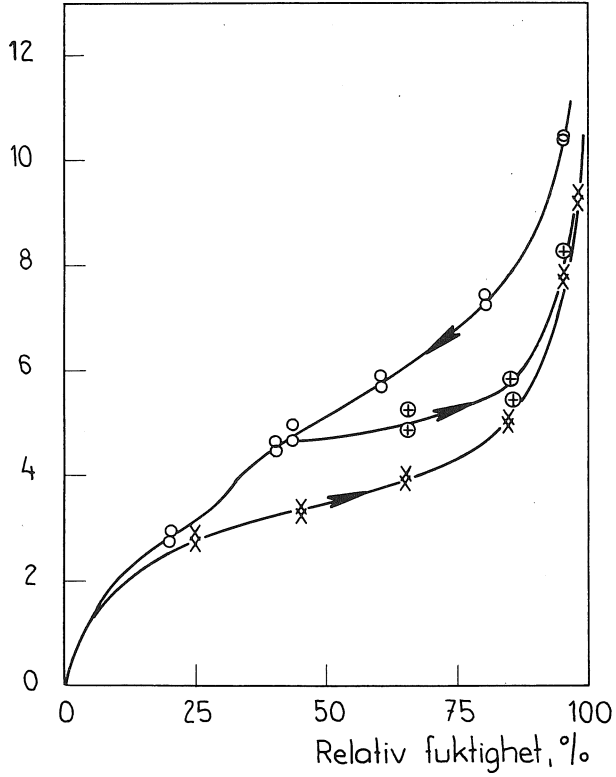


FIG I:13 Porballastbetong, light-weight concrete;
murblock, building-stones; $\rho=640 \text{ kg/m}^3$;
öppen porositet, open porosity=47 %.

Fuktkvot, viktsprocent

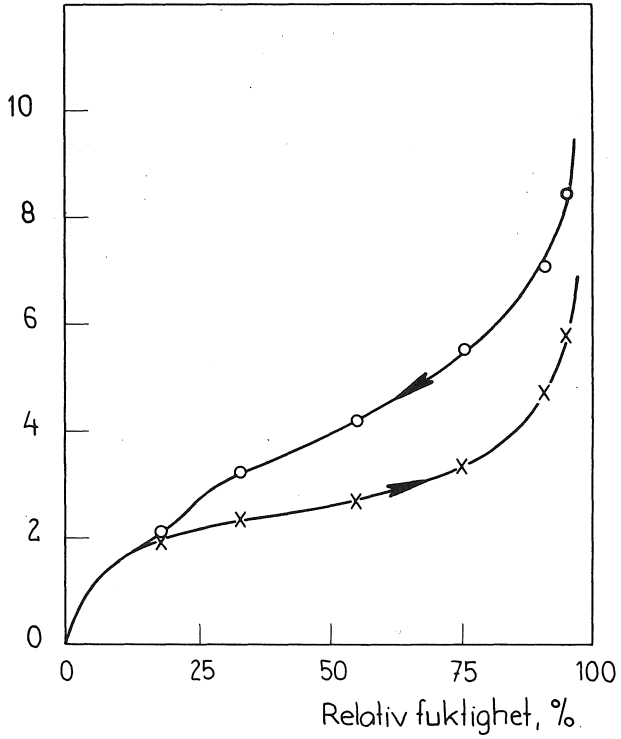


FIG I:14 Porballastbetong, light-weight concrete;
murblock, building-stones; $\rho=715 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

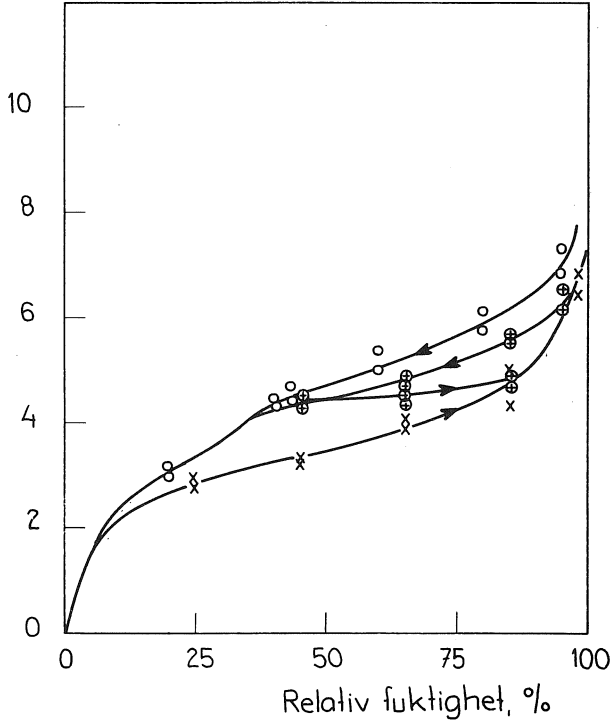


FIG I:15 Porballastbetong, light-weight concrete;
murblock, building-stones; $\rho=1200 \text{ kg/m}^3$;
öppen porositet, open porosity=45 %.

Fuktkvot, viktsprocent

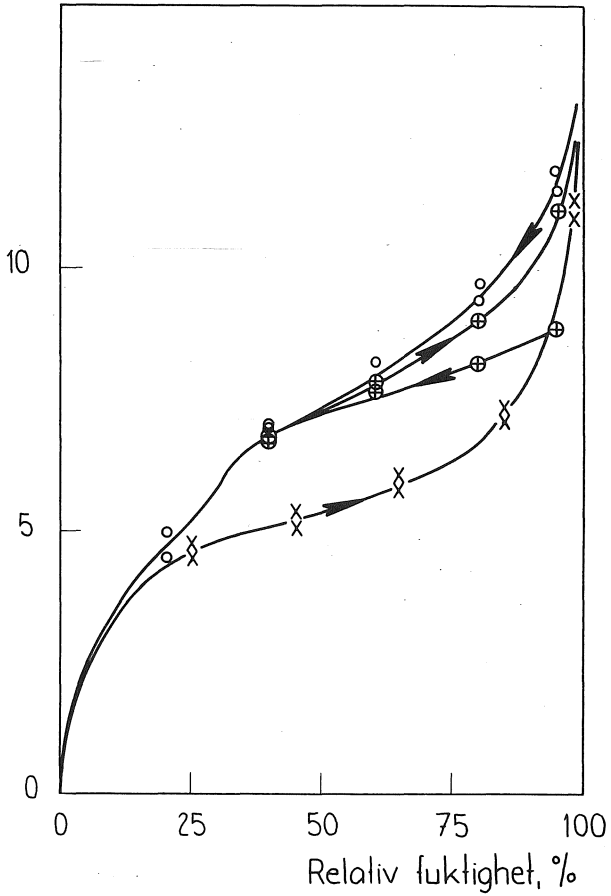


FIG I:16 Asbestcement, asbestos cement; löspresad, lightly pressed; $\rho=1880 \text{ kg/m}^3$; porositet, porosity=37 %.

Fuktkvot, viktsprocent

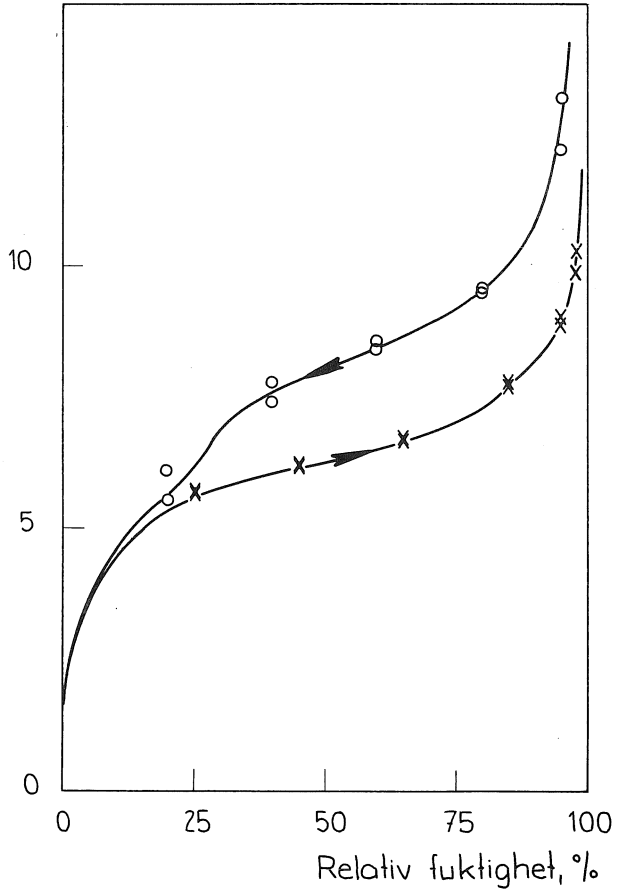


FIG I:17 Asbestcement, asbestos cement; hårdpressad, heavily pressed; $\rho=2030 \text{ kg/m}^3$; porositet, porosity=30 %.

Fuktkvot, viktsprocent

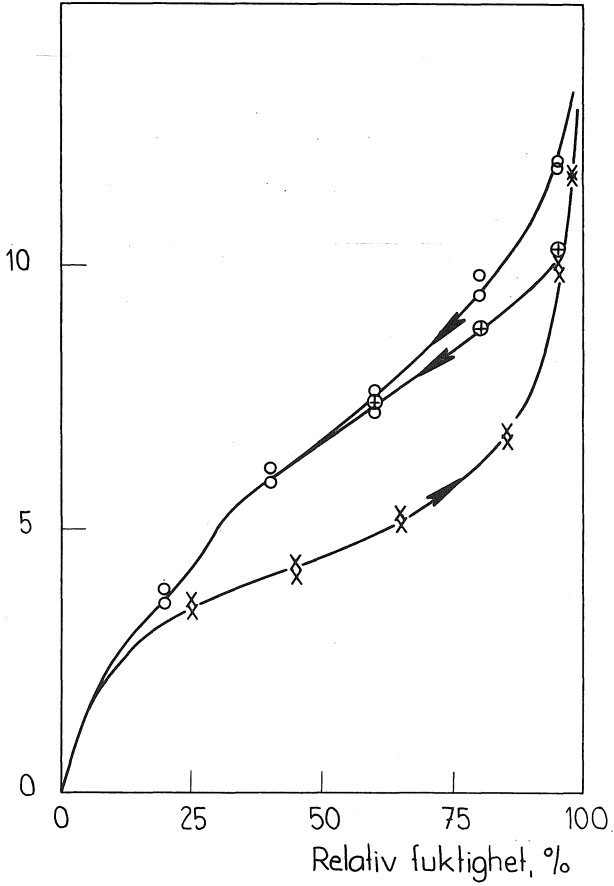


FIG I:18 Asbest-cellulosacement, asbestos-cellulose cement; $\rho=1510 \text{ kg/m}^3$; porositet, porosity=43 %.

Fuktkvot, viktprocent

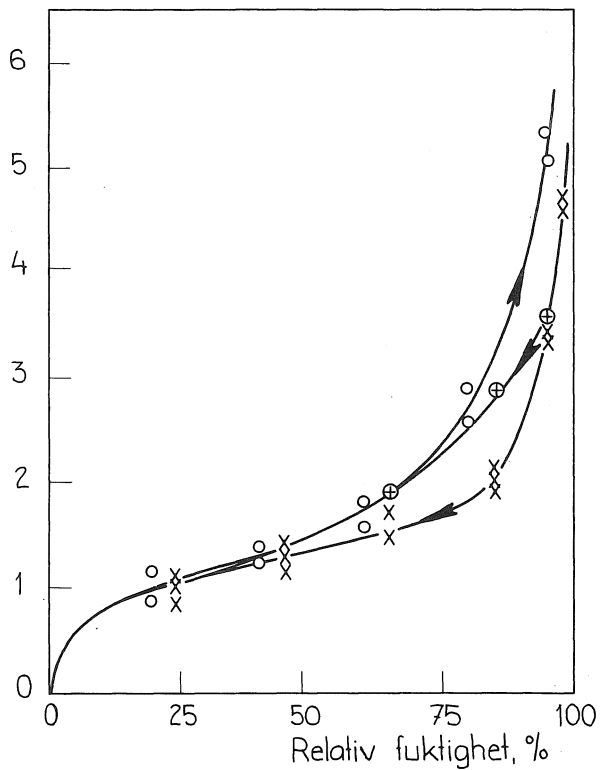


FIG I:19 Kalksandsten, lime-sandstone; $\rho=1700 \text{ kg/m}^3$;
porositet, porosity=34 %.

Fuktkvot, viktprocent

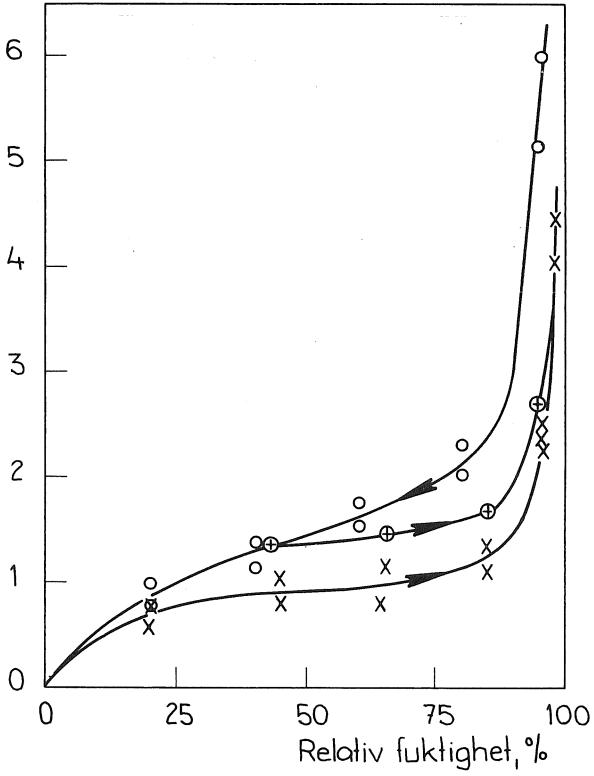


FIG I:20 Kalksandsten, lime-sandstone; $\rho=1830 \text{ kg/m}^3$; porositet, porosity=31 %.

Fuktkvot, viktprocent

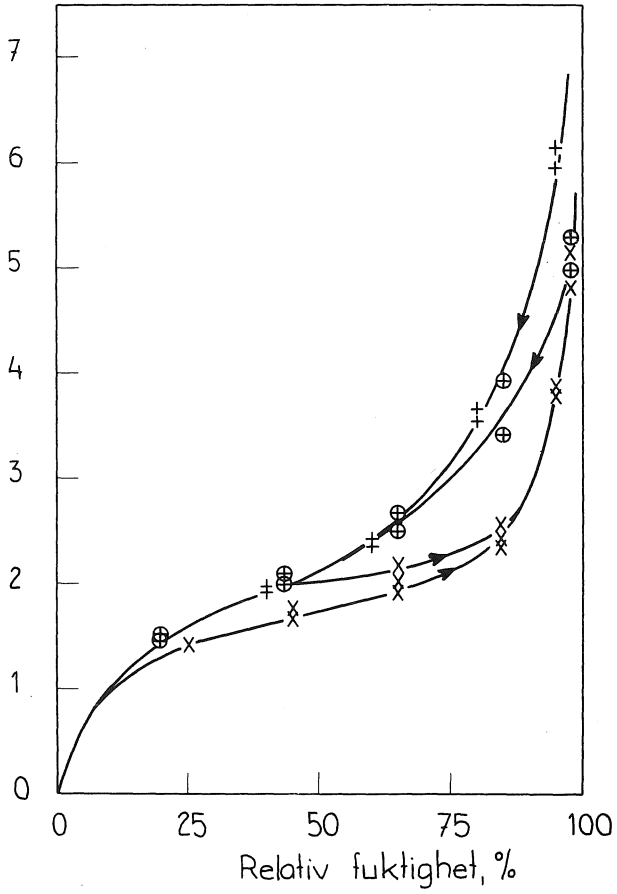


FIG I:21 Kalksandsten, lime-sandstone; $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$;
porositet, porosity=29 %.

Fuktkvot, viktsprocent

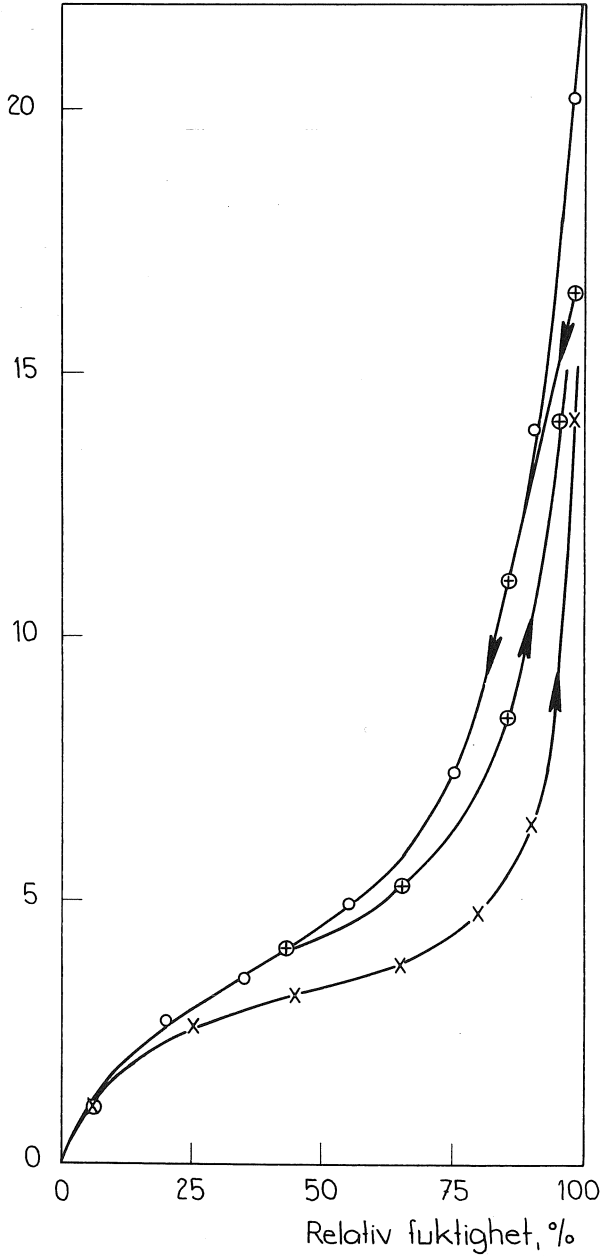


FIG I:22 Högtrycksånghärdad gasbetong, cellular concrete;
 $\rho=510 \text{ kg/m}^3$; porositet, porosity 79 %.

Fuktkvot, viktsprocent

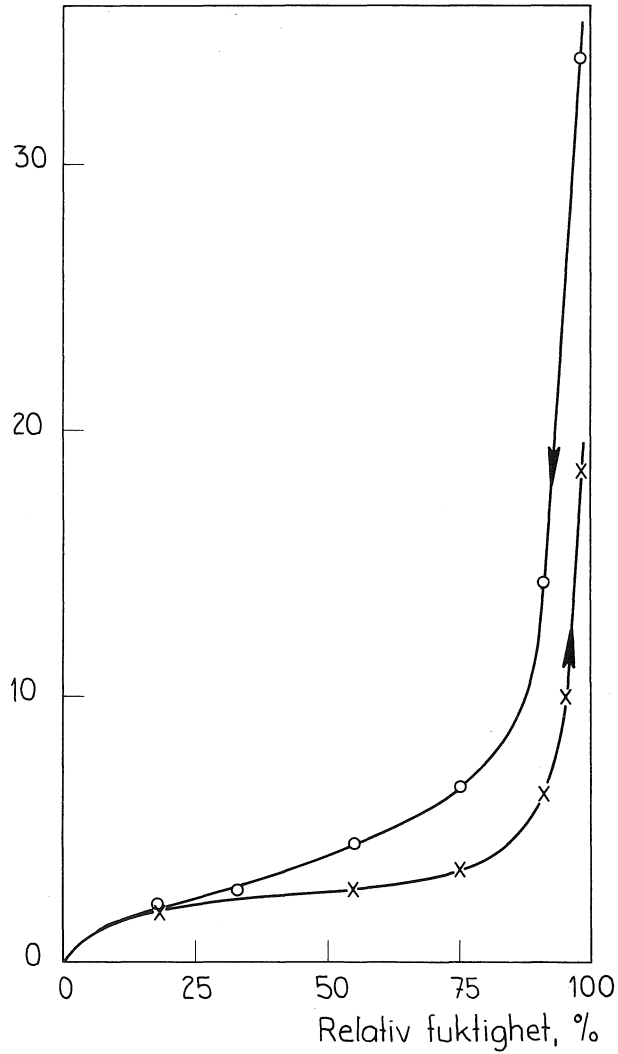


FIG I:23 Högtrycksånghärdad gasbetong, cellular concrete;
 $\rho=500 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktprocent

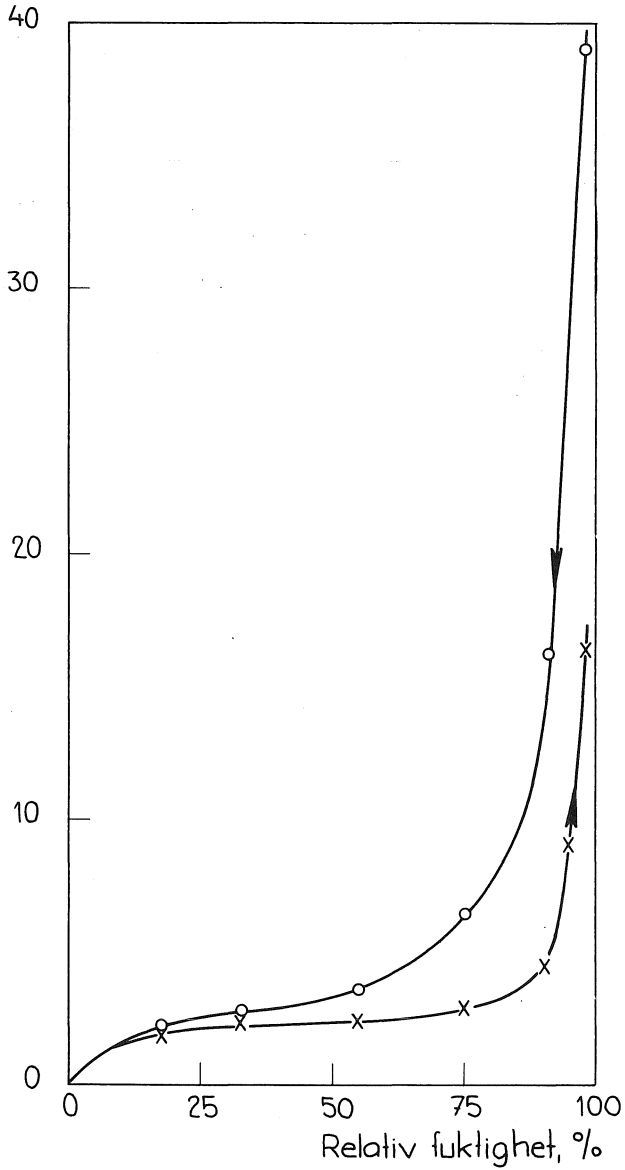


FIG I:24 Högtrycksånghärdad gasbetong, cellular concrete;
 $\rho=500 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

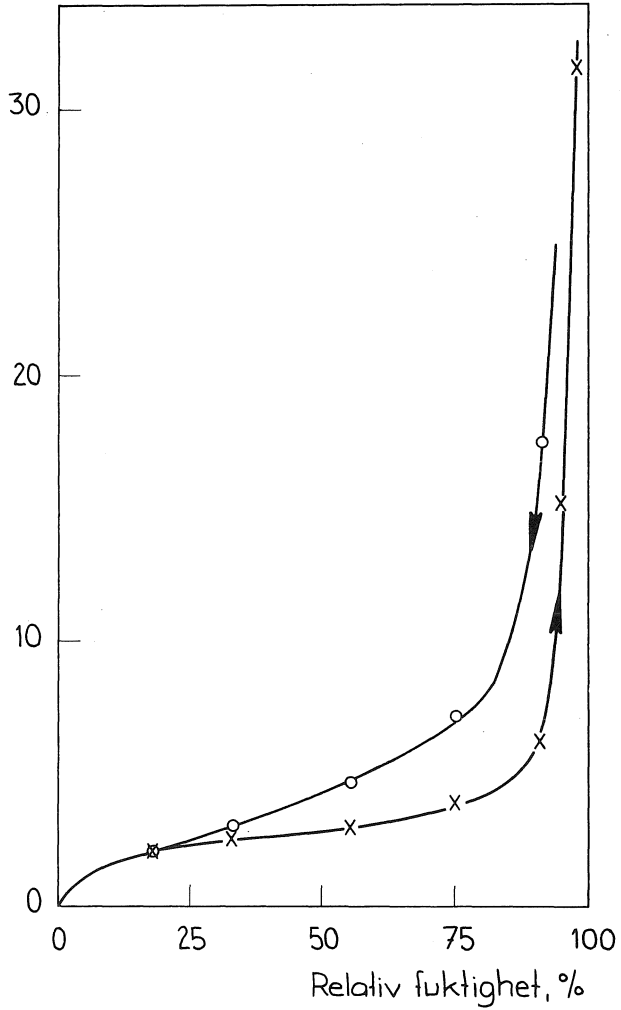


FIG I:25 Högtrycksånghärdad gasbetong, cellular concrete;
 $\rho=475 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

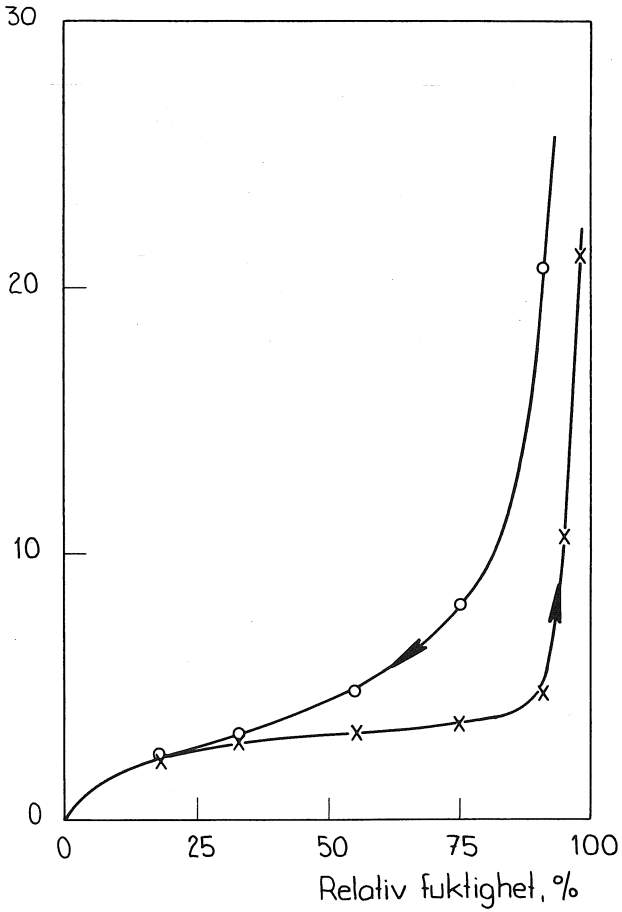


FIG I:26 Högtrycksåghärdad gasbetong, cellular concrete;
 $\rho=230 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktprocent

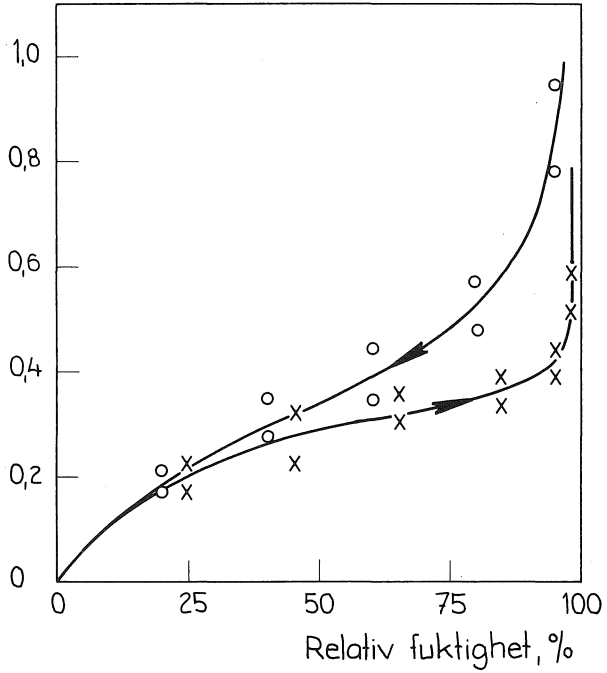


FIG I:27 Tegel, brick; $\rho=1680 \text{ kg/m}^3$; öppen porositet, open porosity=40 %.

Fuktkvot, viktsprocent

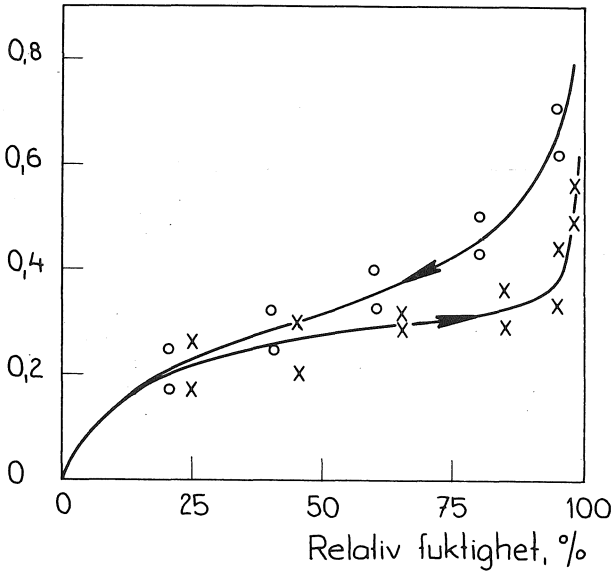


FIG I:28 Tegel, brick; $\rho=1860 \text{ kg/m}^3$; öppen porositet, open porosity=31 %.

Fuktkvot, viktsprocent

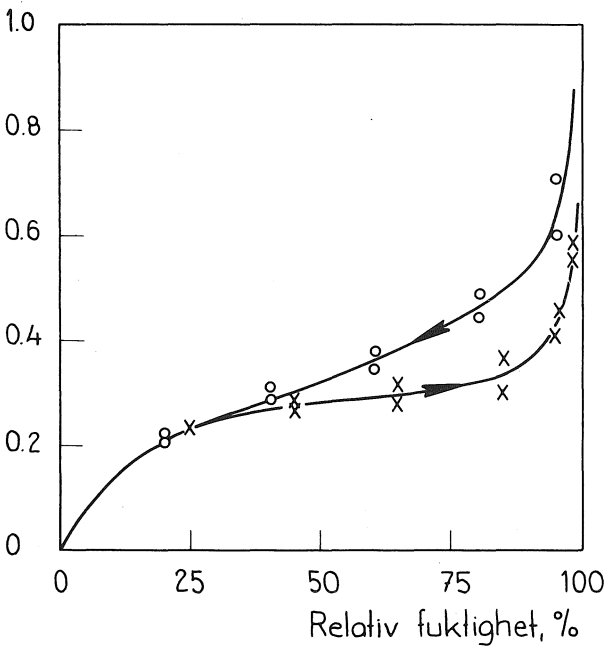


FIG I:29 Tegel, brick; $\rho=1890 \text{ kg/m}^3$; öppen porositet, open porosity=31 %.

Fuktkvot, viktsprocent

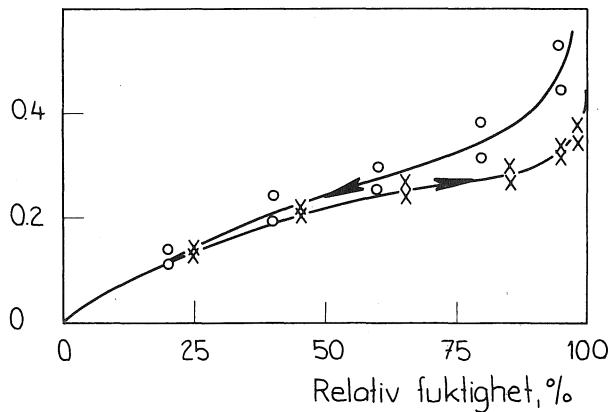


FIG I:30 Tegel, brick; $\rho=2030 \text{ kg/m}^3$; öppen porositet, open porosity=14 %.

Fuktkvot, viktsprocent

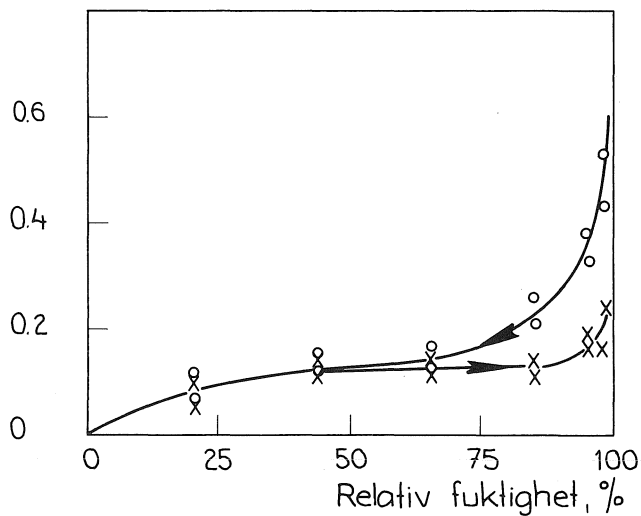


FIG I:31 Lättklinkerkorn, expanded clay; $\rho=910 \text{ kg/m}^3$; öppen porositet, open porosity=62 %.

Fuktkvot, viktsprocent

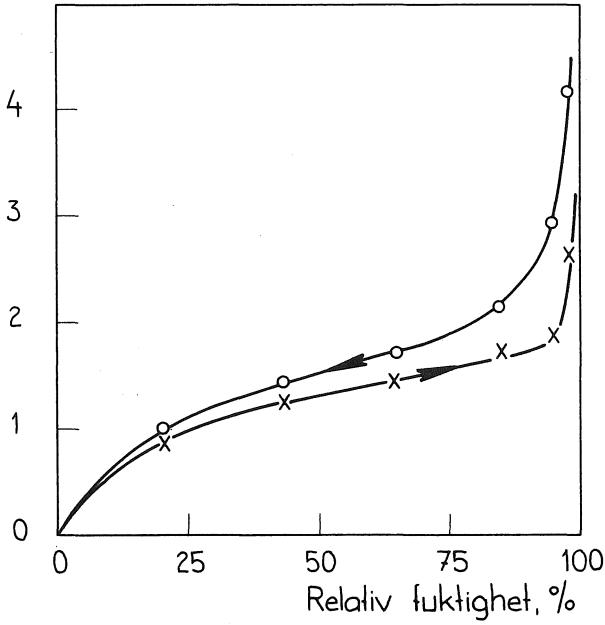


FIG I:32 Mineralull, mineral wool; glasull, glass wool; $\rho=18 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

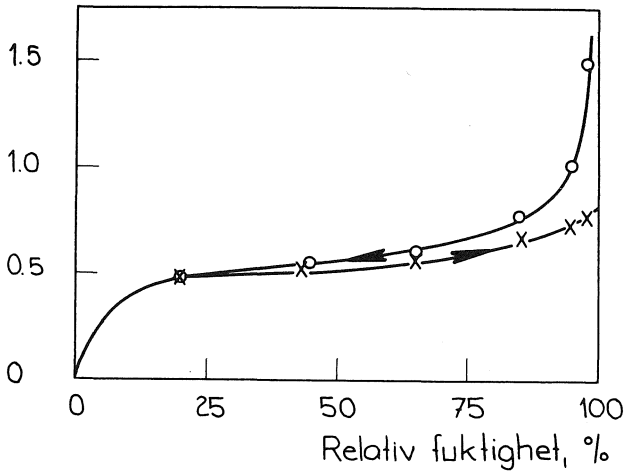


FIG I:33 Mineralull, mineral wool; stenull, rock wool; $\rho=42 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

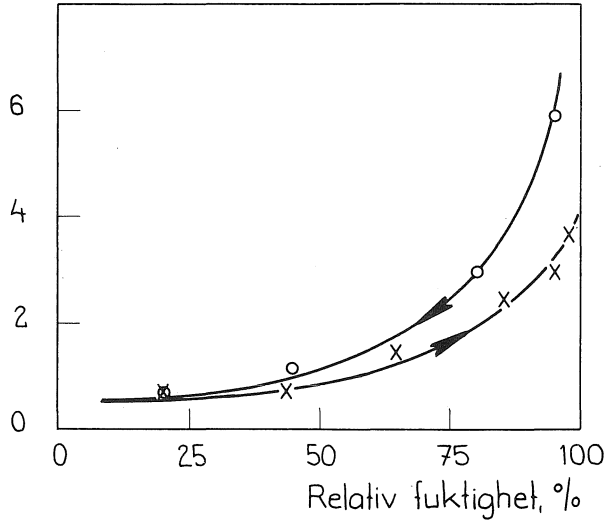


FIG I:34 Gips, plaster; $\rho=1240 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

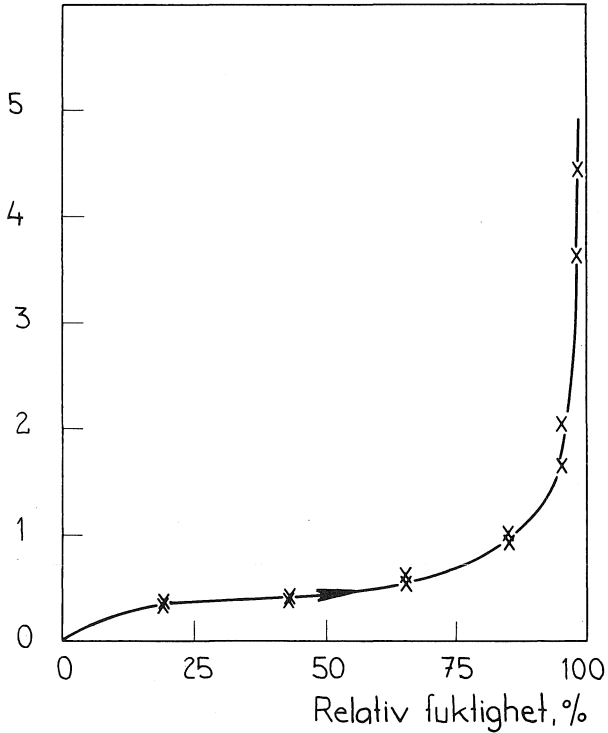


FIG I:35 Sandsten, sandstone; röd, red; $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktprocent

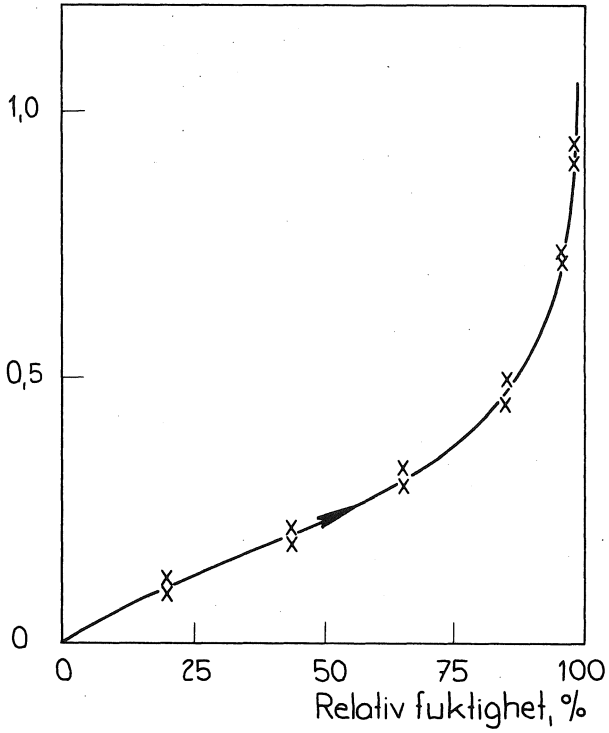


FIG I:36 Kalksten, limestone; grå, grey; $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

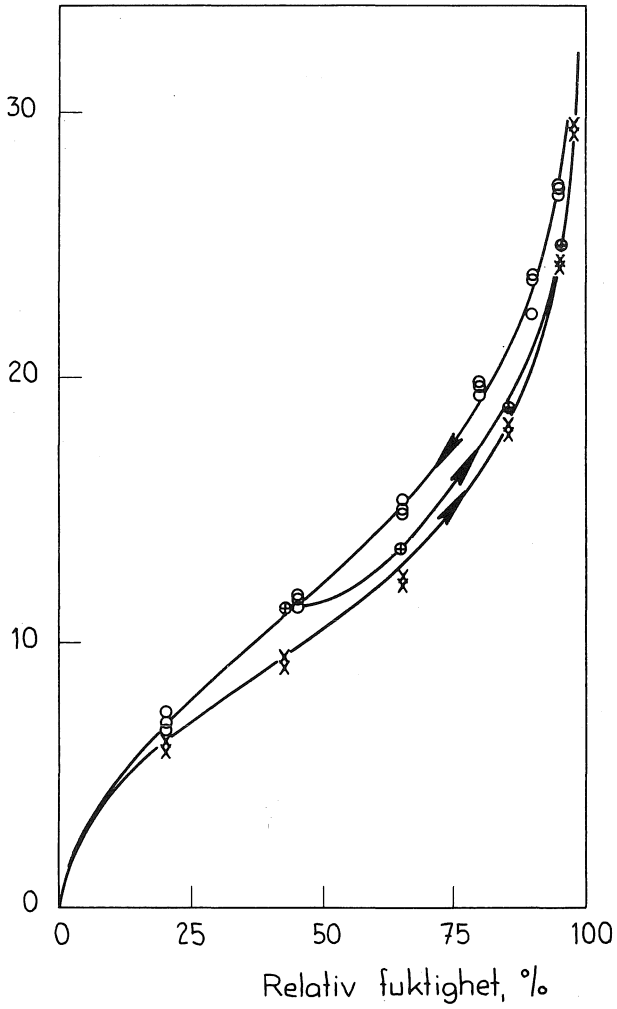


FIG I:37 Furu, pine; $\rho=510 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

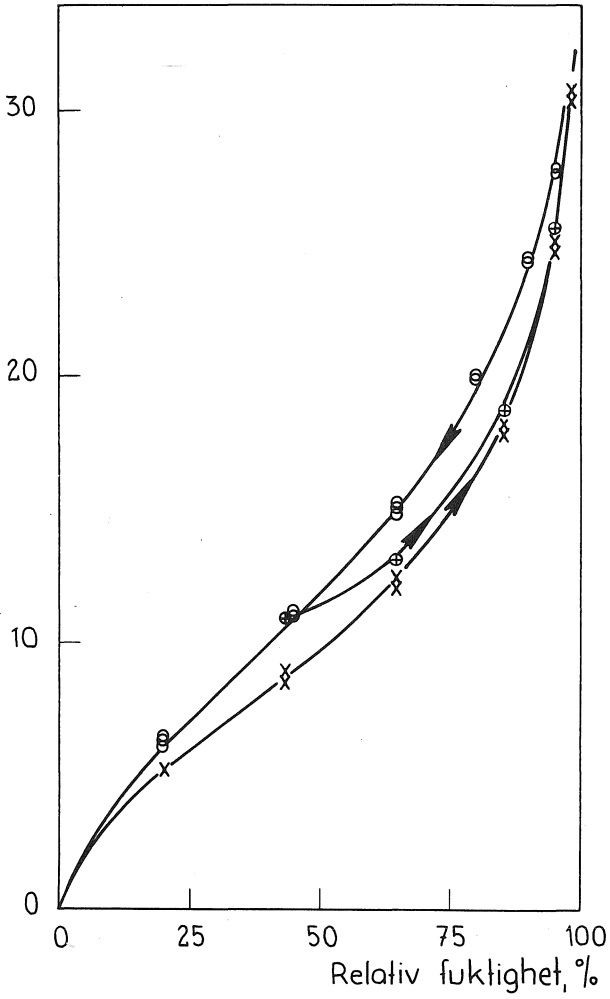


FIG I:38 Gran, spruce; $\rho=420 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

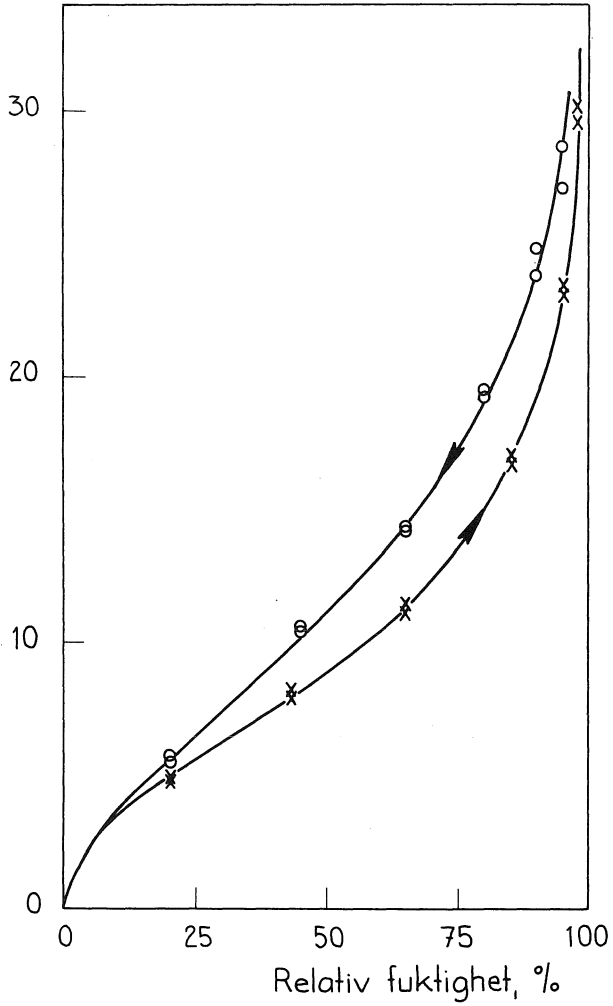


FIG I:39 Bok, beech; $\rho=750 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

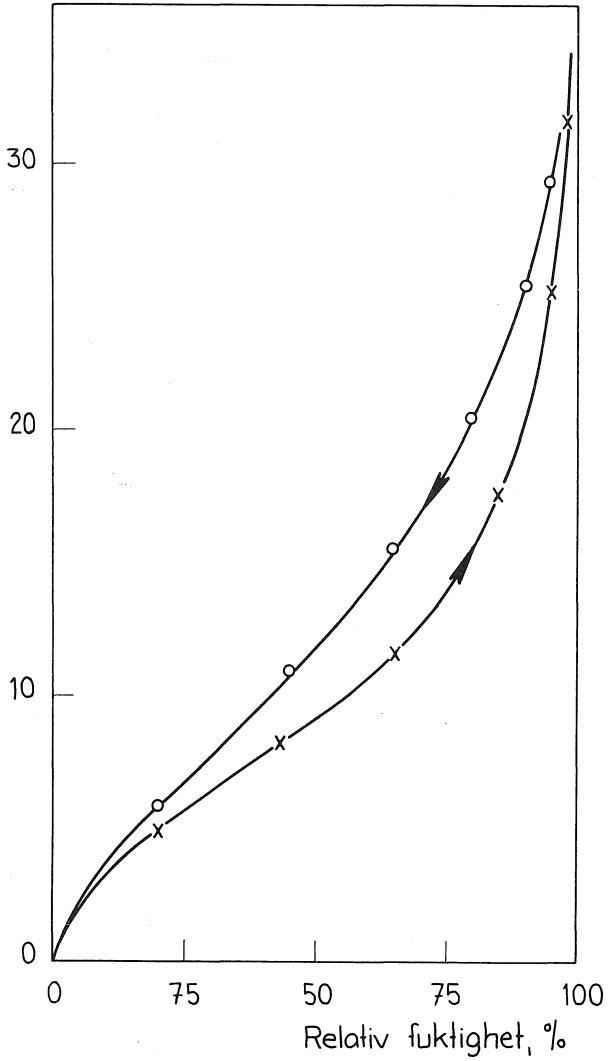


FIG I:40 Björk, birch; $\rho=600 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktspocent

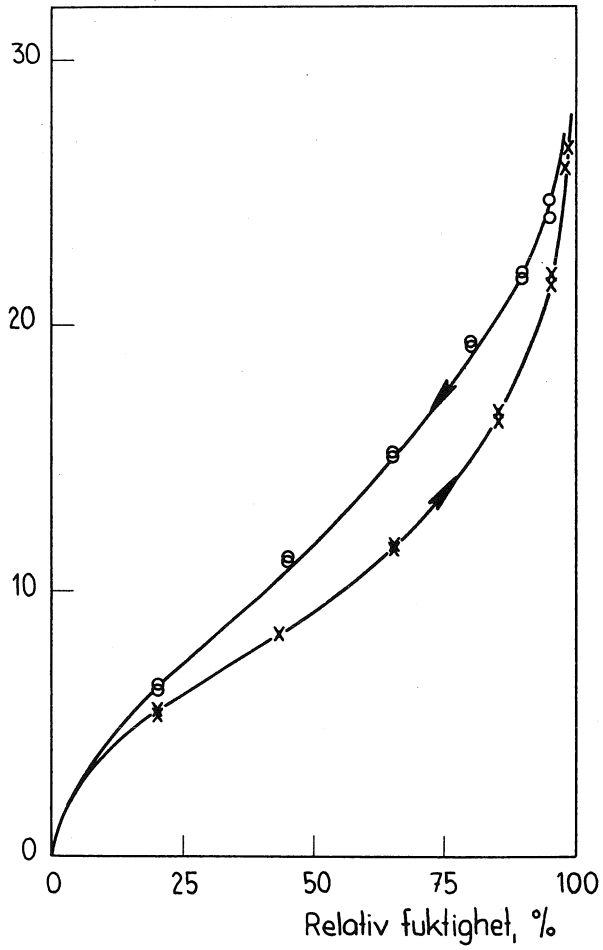


FIG I:41 Ek, oak; $\rho=780 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktprocent

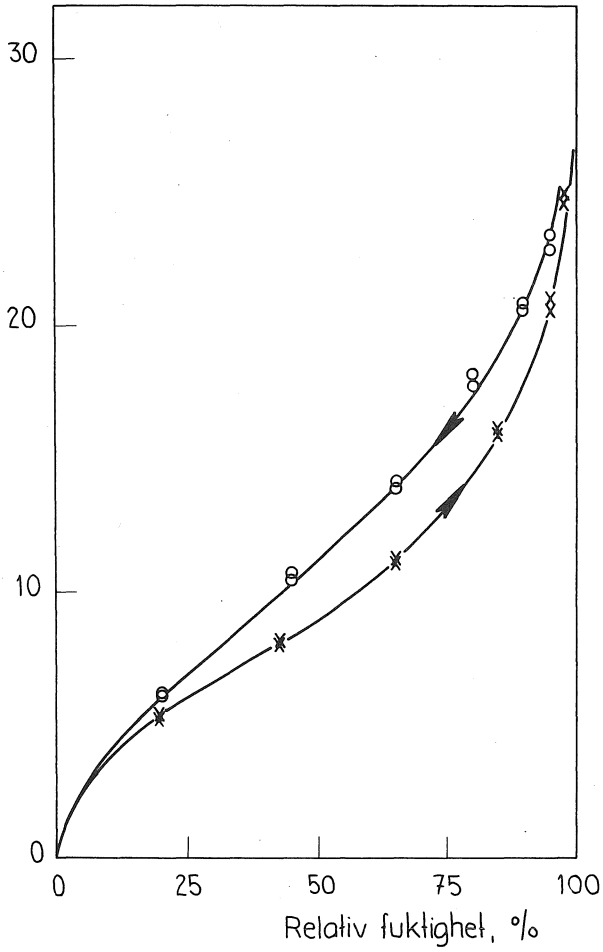


FIG I:42 Oregon pine; $\rho = 560 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

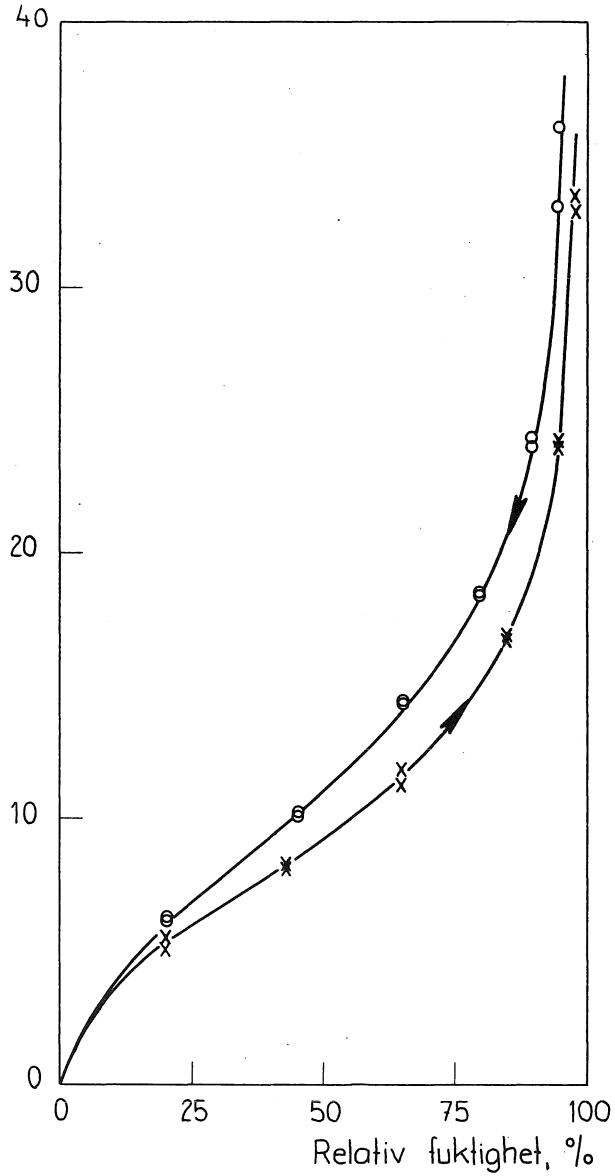


FIG I:43 Träfiberskiva, porös; Board,porous;
 $\rho=300 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

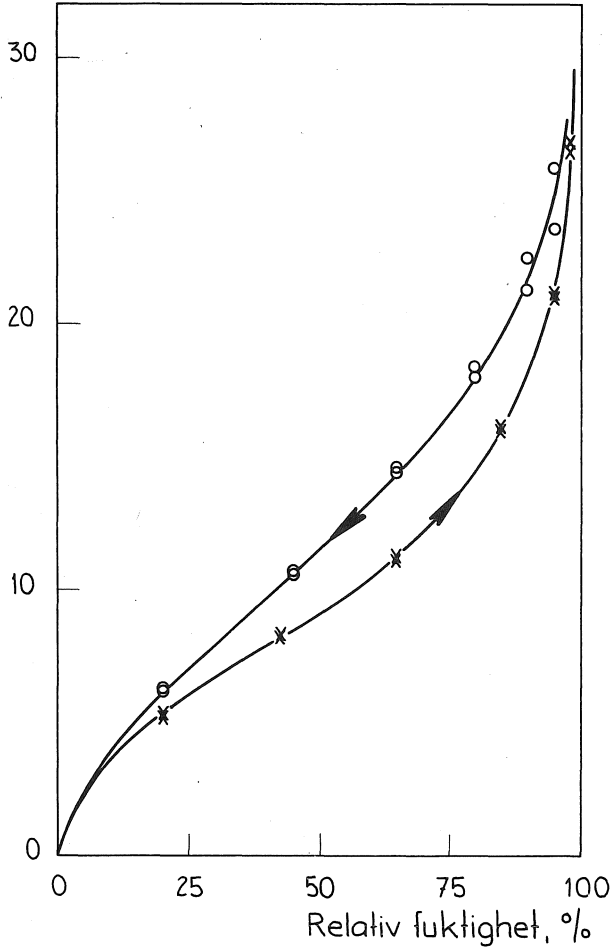


FIG I:44 Träfiberskiva, halvhård; Board, semi-hard;
 $\rho=780 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

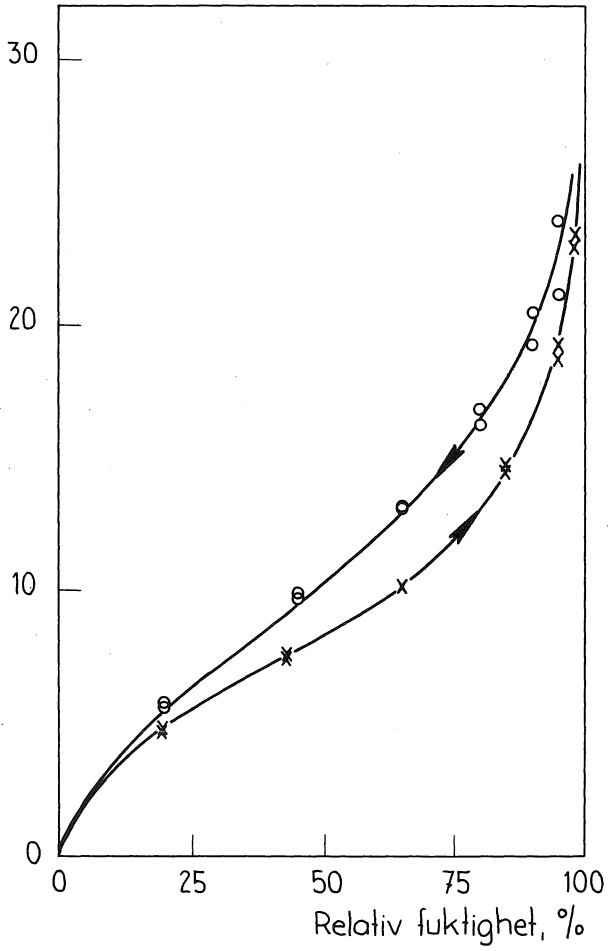


FIG I:45 Träfiberskiva, hård; Board, hard; $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

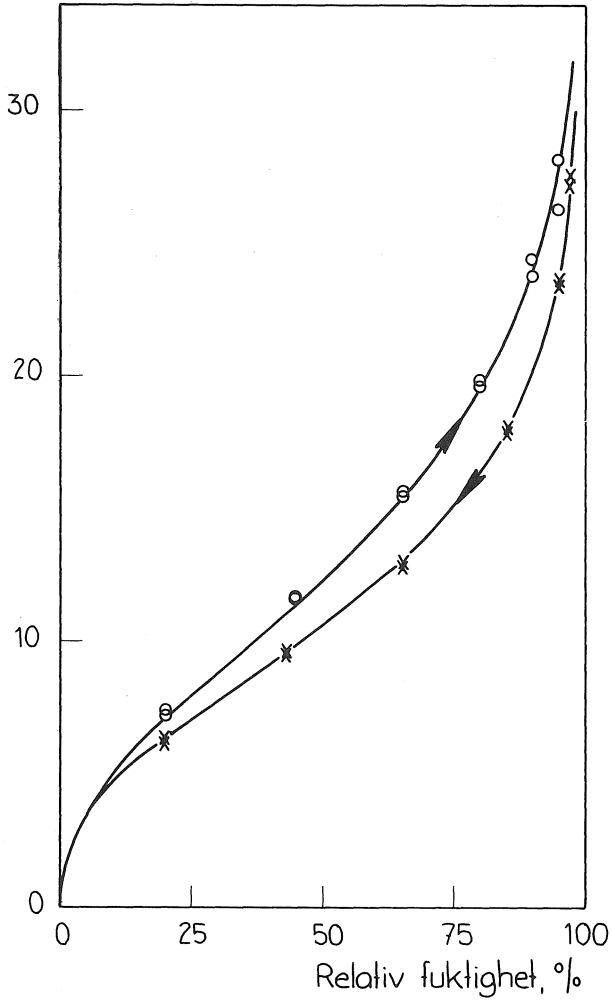


FIG I:47 Kryssfanér, plywood; $\rho=600 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktprocent

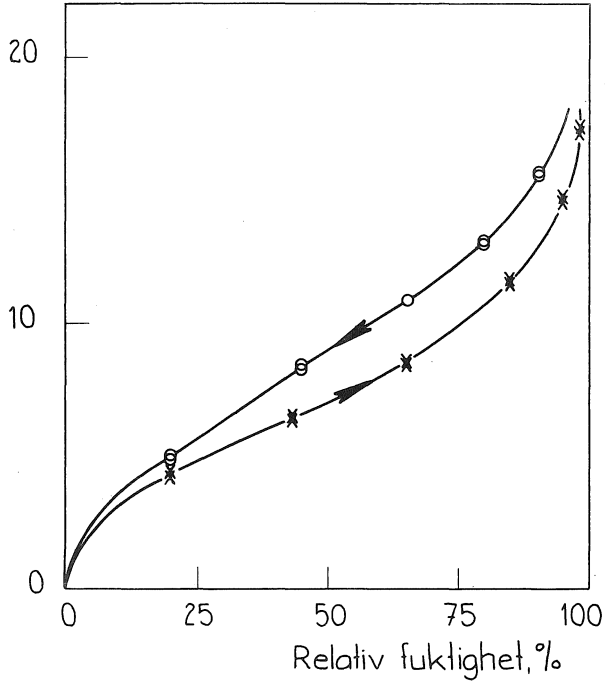


FIG I:46 Träfiberskiya, oljehärdad; Board, oil-hardened;
 $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

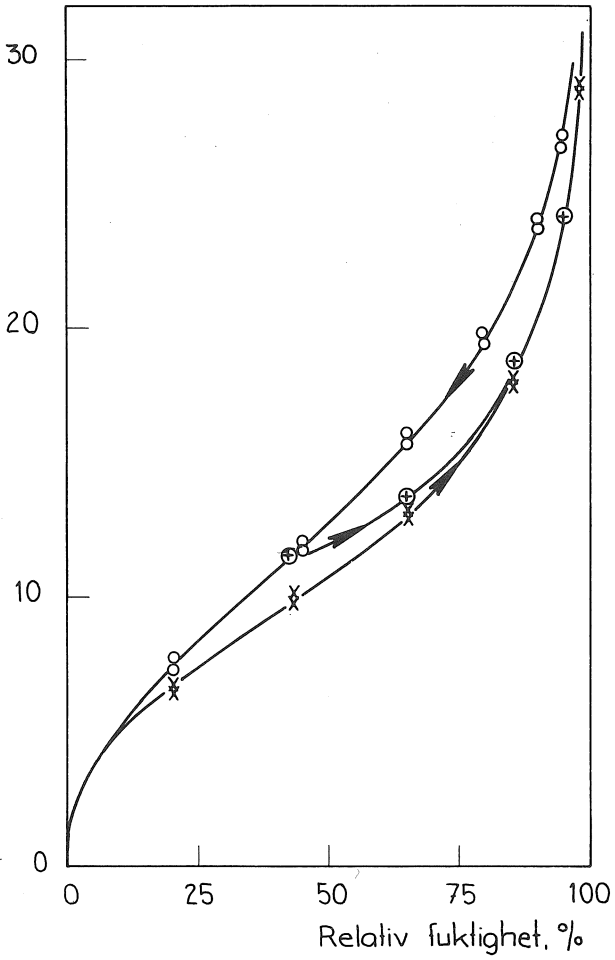


FIG I:48 Spånskiva, wood-particle board; $\rho=610 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

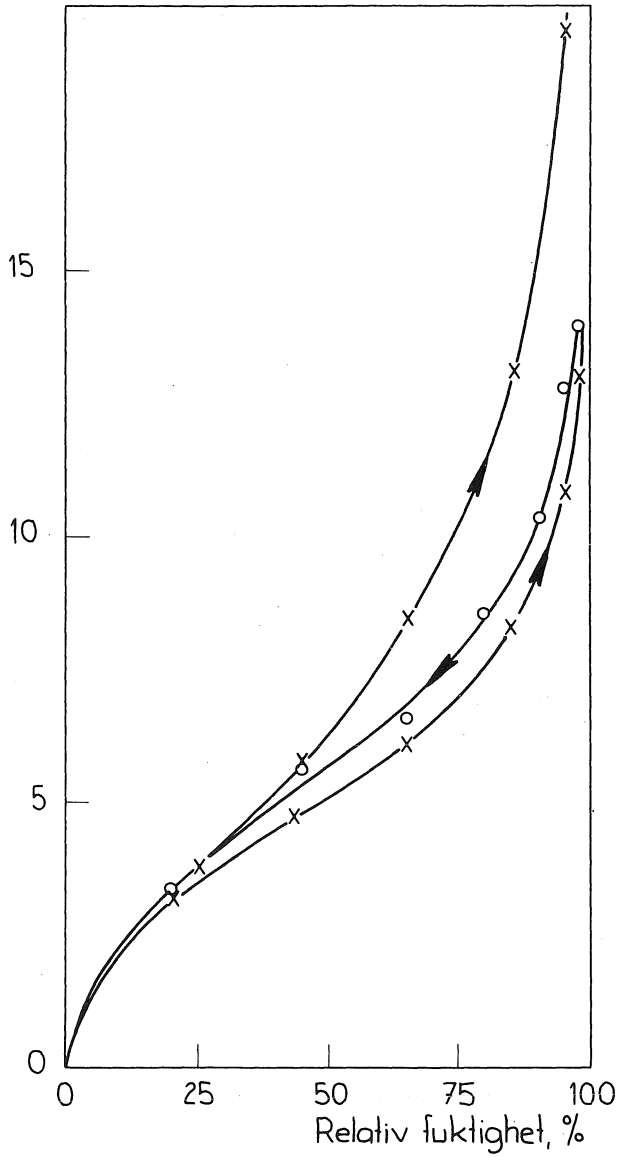


FIG I:49 Kork ock korkmjöl; Cork and cork meal.

Fuktkvot, viktprocent

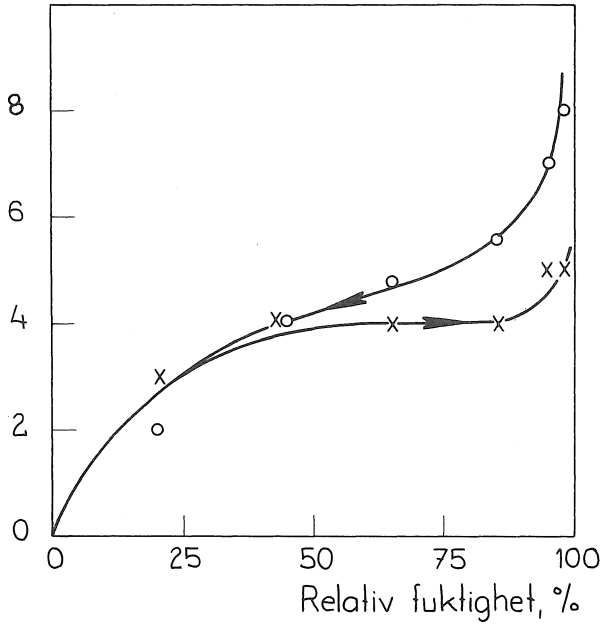


FIG I:50 Expanderad polystyren, expanded polystyren;
 $\rho=31 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktsprocent

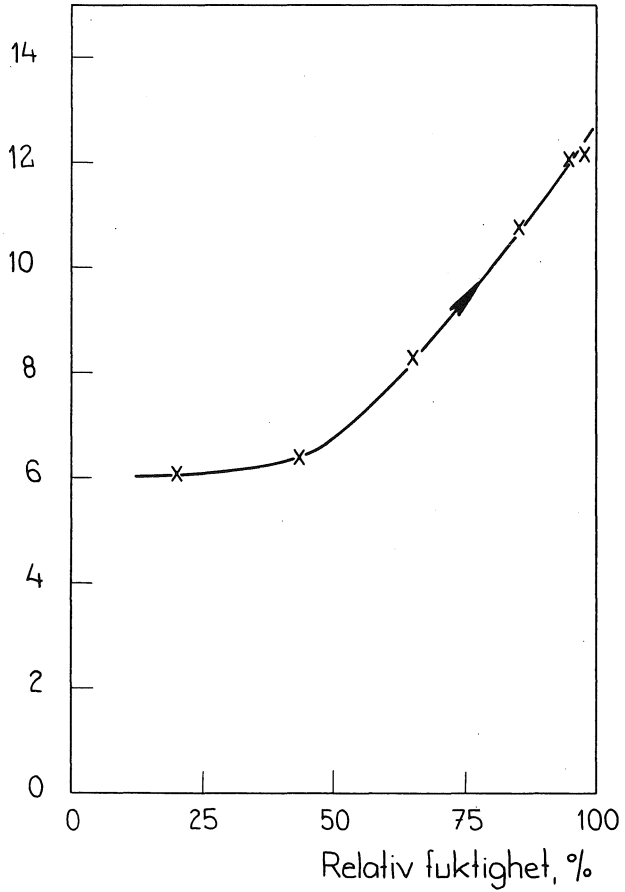


FIG I:51 Uretancellplast, urethane foam; $\rho=25 \text{ kg/m}^3$.

Fuktkvot, viktprocent

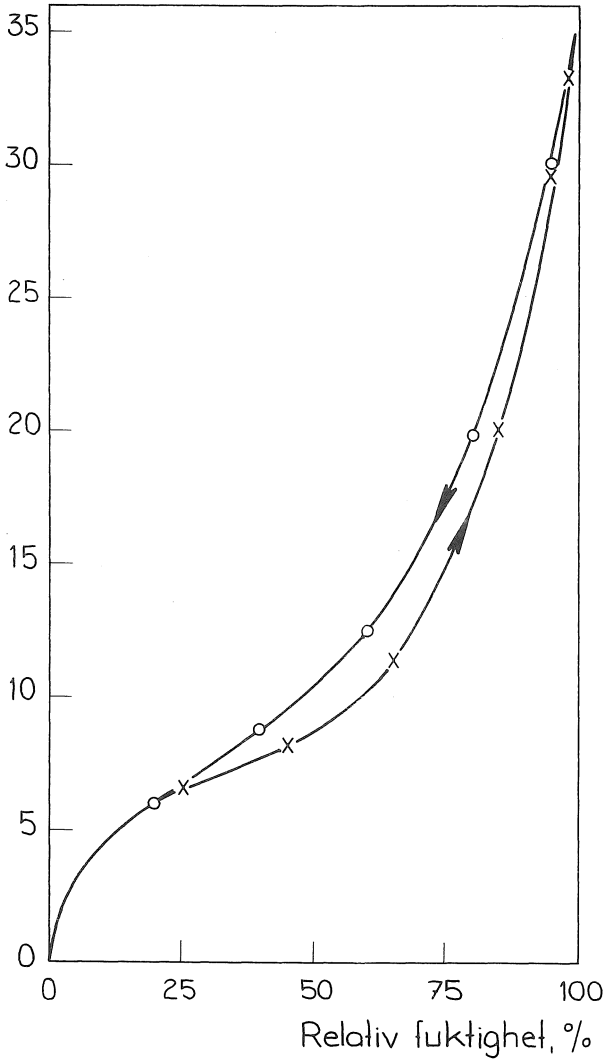


FIG I:52 Juteväv, jute web.

Fuktkvot, viktsprocent

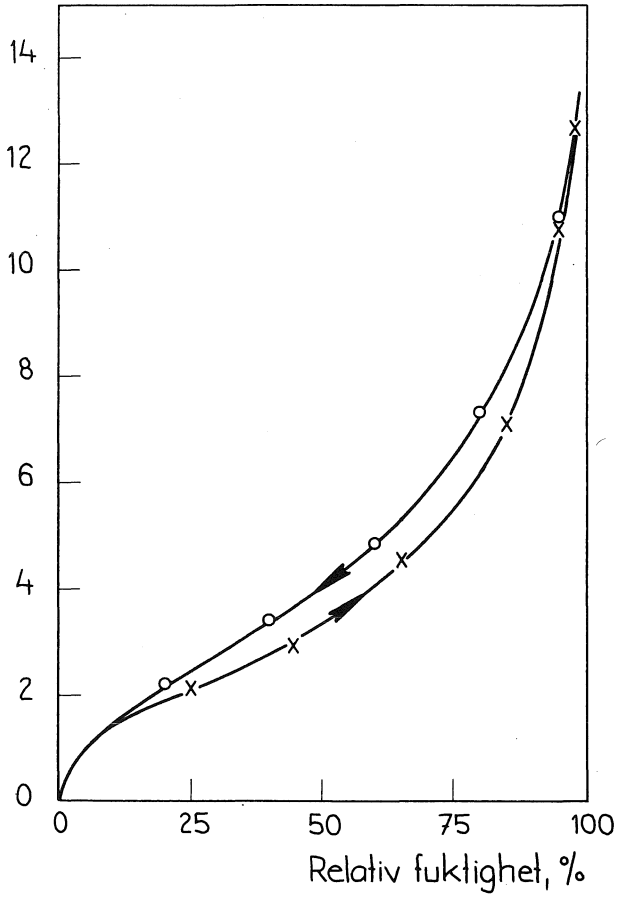


FIG I:53 Linoleummatta, linoleum carpet; 2 mm.

Fuktkvot, viktsprocent

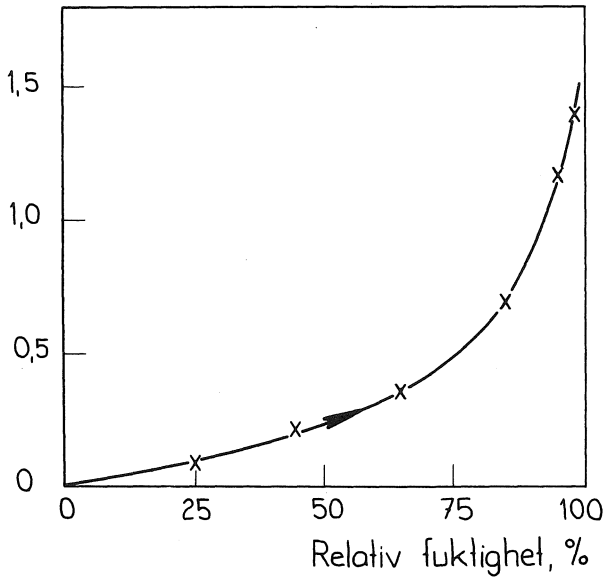


FIG I:54 Plastmatta, plastic carpet (PVC); 3 mm.

BILAGA II

ANPASSNING AV BET-TEORIN TILL ABSORPTIONS-
ISOTERMER ENLIGT BILAGA I

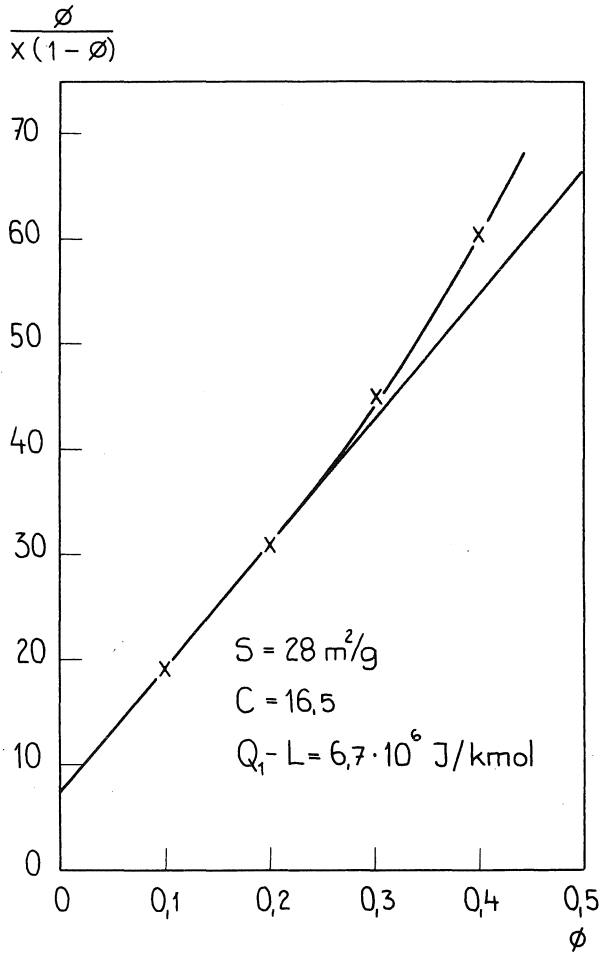


FIG II:1 Betong med isotherm enligt fig I:4.
Concrete with isotherm according to fig I:4.

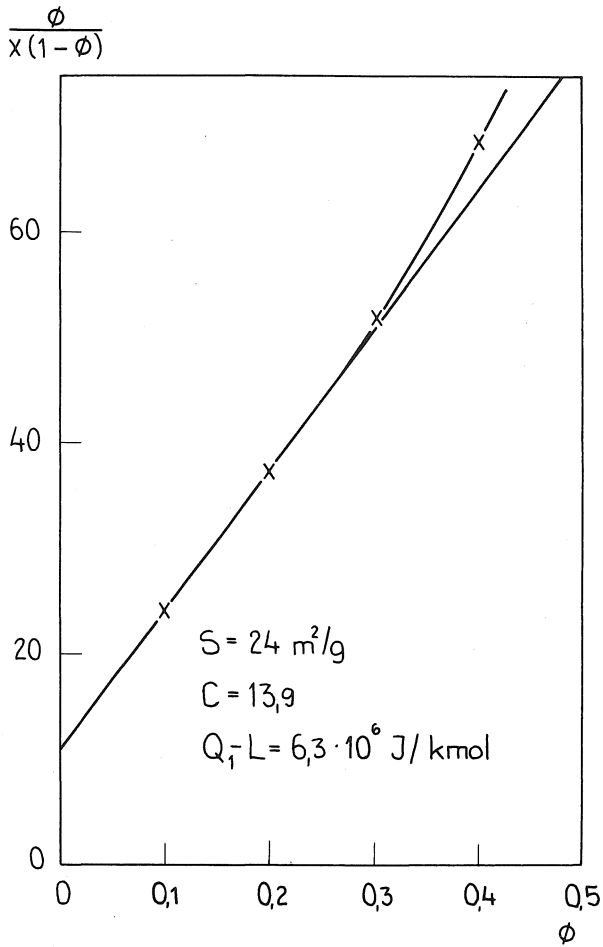


FIG II:2 Betong med isotherm enligt fig I:5.
Concrete with isotherm according to fig I:5.

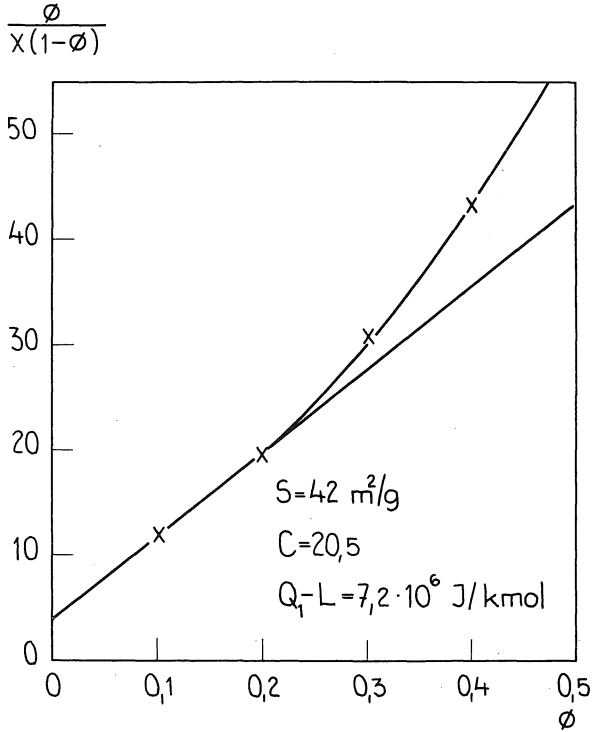


FIG II:3 Betong med isotherm enligt fig I:6.

Concrete with isotherm according to fig I:6.

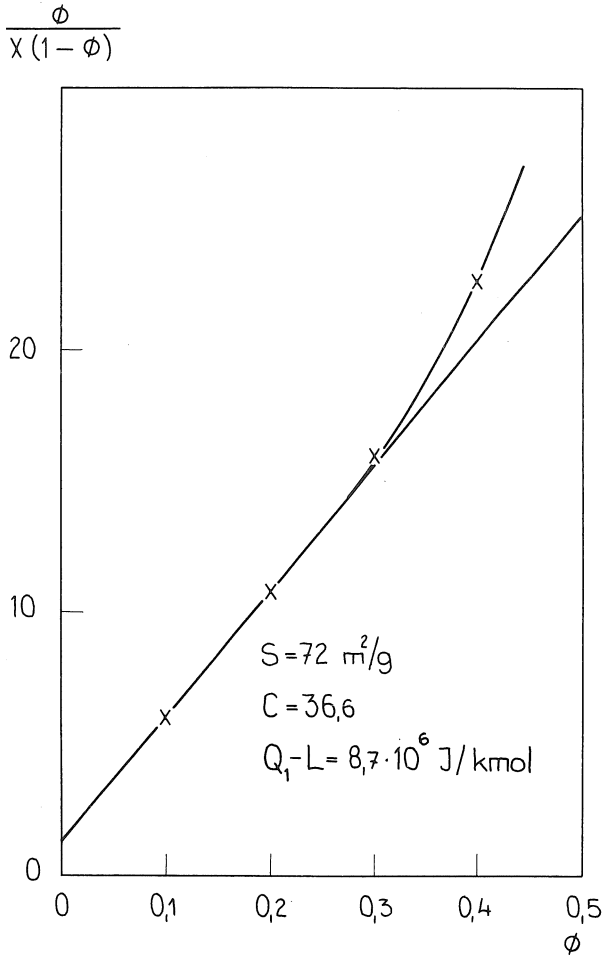


FIG II:4 Porballastbetong med isotherm enligt fig I:12.

Light-weight concrete with isotherm according to fig I:12.

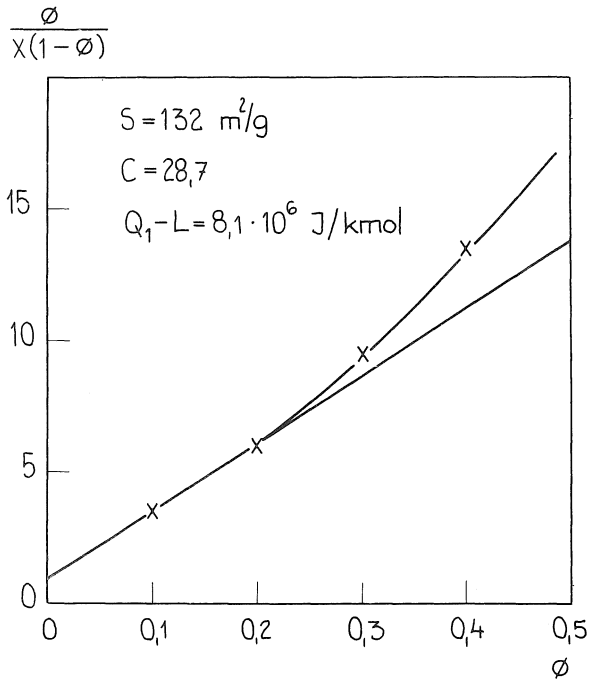


FIG II:5 Asbestcement med isotherm enligt fig I:16.
Asbestos cement, lightly pressed.

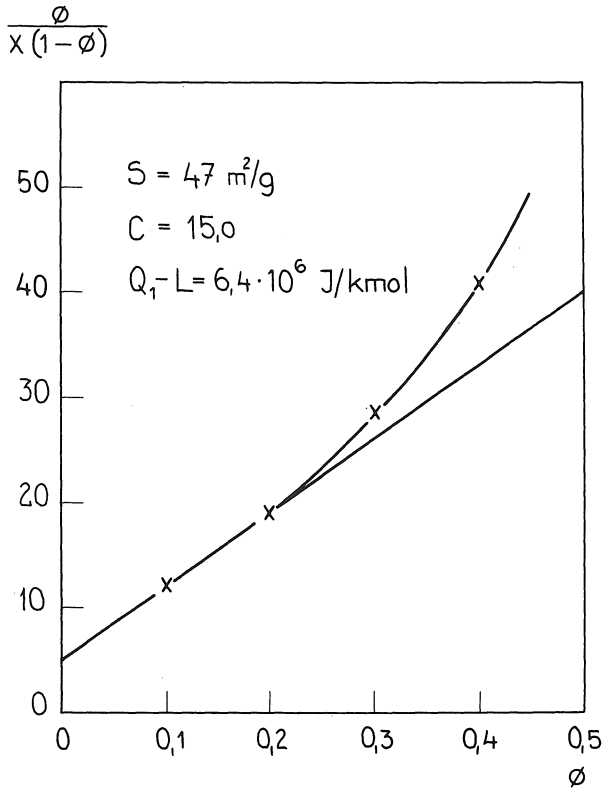


FIG II:6 Kalksandsten med isotherm enligt fig I:21.
Lime-sandstone with isotherm according to fig I:21.

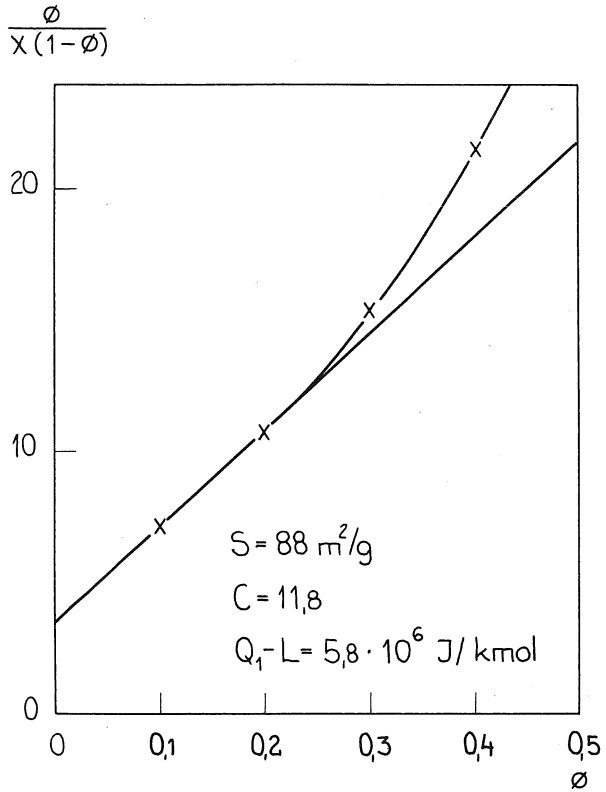


FIG II:7 Gasbetong med isotherm enligt fig I:22.

Cellular concrete with isotherm according to fig I:22.

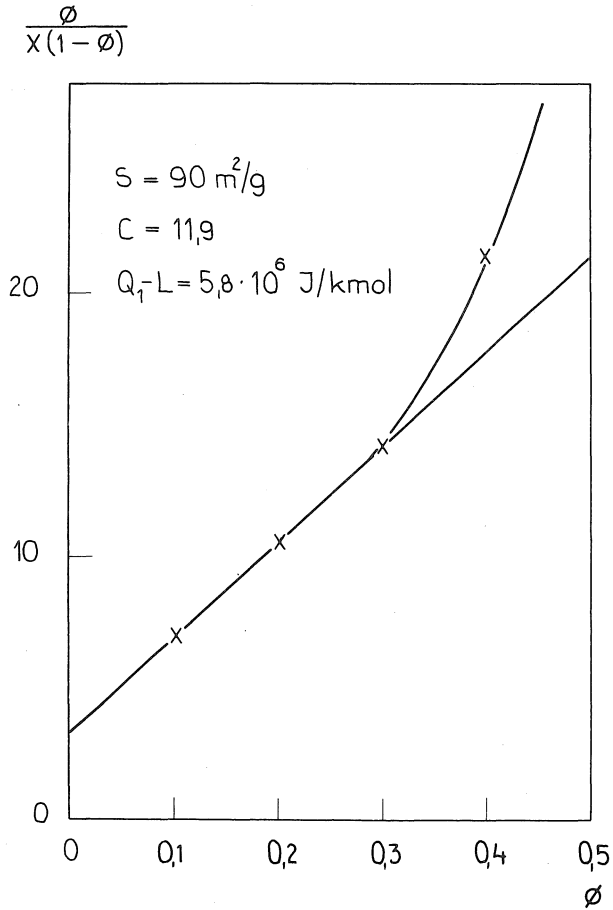


FIG II:8 Gasbetong med isotherm enligt fig I:26.

Cellular concrete with isotherm according to fig I:26.

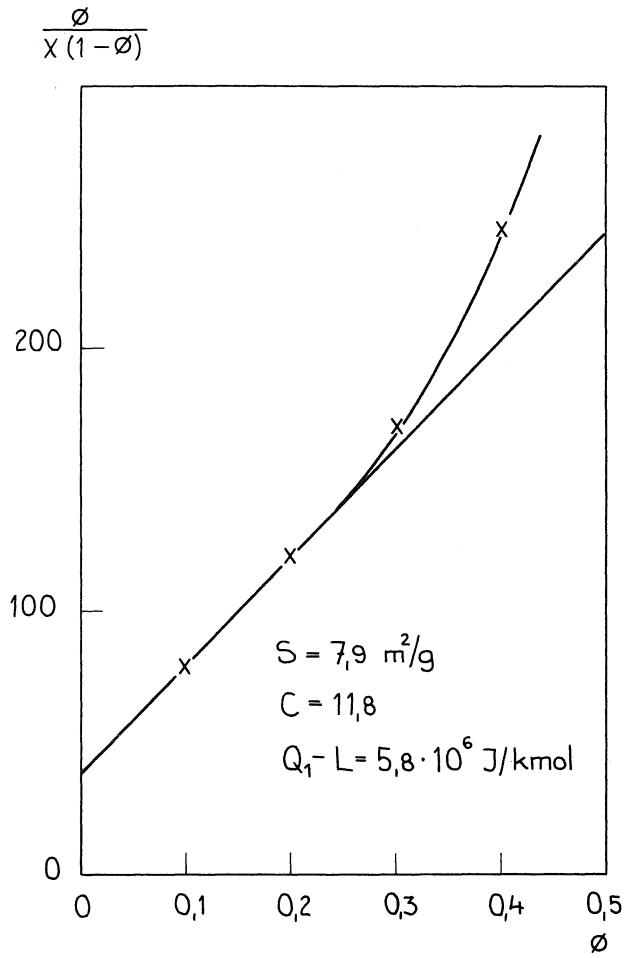


FIG II:9 Tegel med isotherm enligt fig I:29.
Brick with isotherm according to fig I:29.

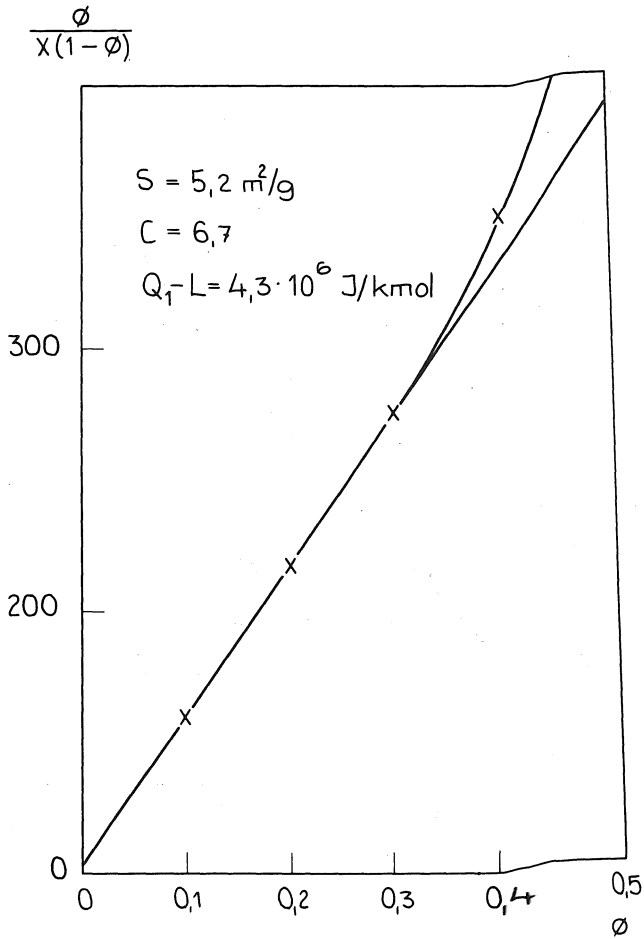


FIG II:10 Tegel med isotherm enligt fig I:30 -
Brick with isotherm according to fig I:30.

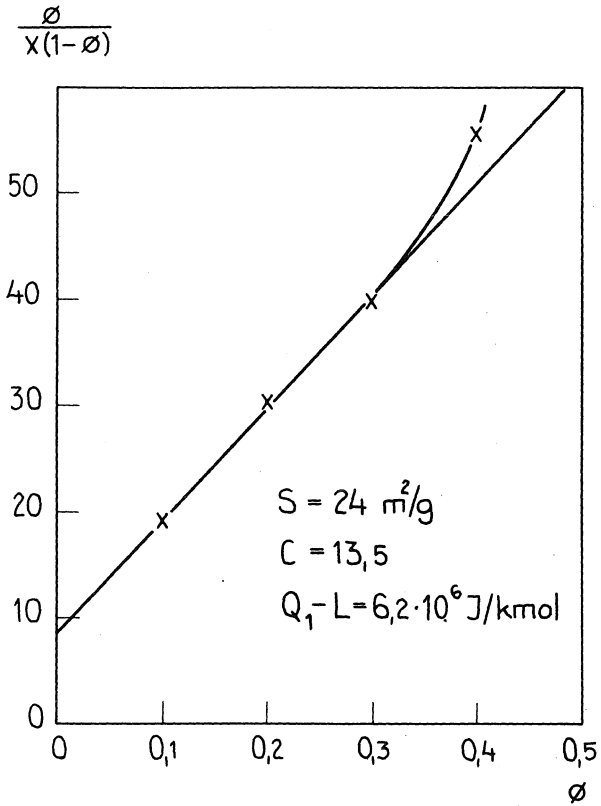


FIG II:11 Glasull med isotherm enligt fig I:32.

Glass wool with isotherm according to fig I:32.

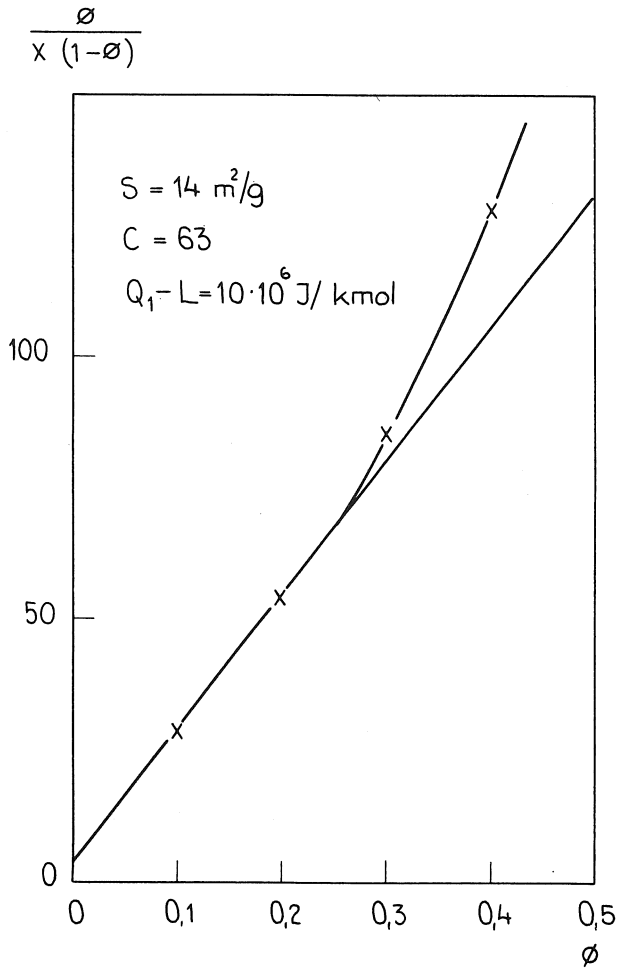


FIG II:12 Stenull med isotherm enligt fig I:33.
Rock wool with isotherm according to fig I:33.

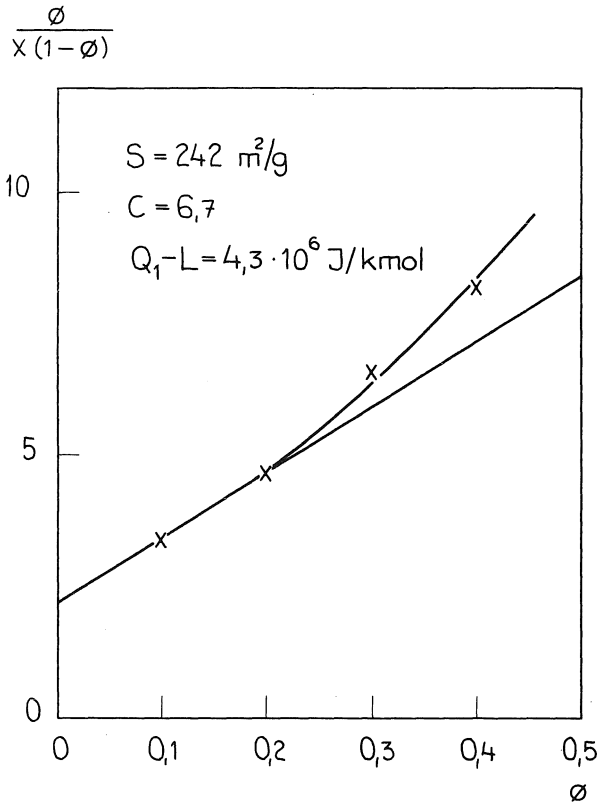


FIG II:13 Gran med isotherm enligt fig I:38.

Spruce with isotherm according to fig I:38.

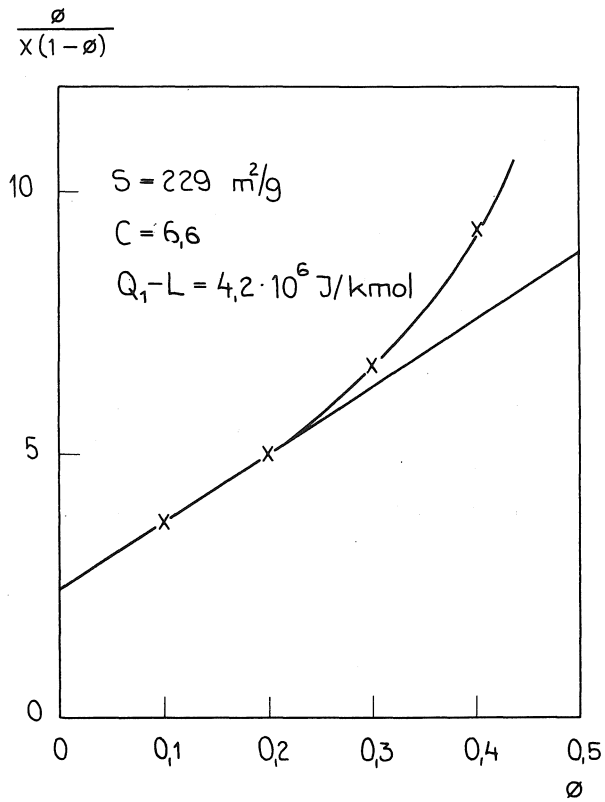


FIG II:14 Hård board med isotherm enligt fig I:45.

Hard board with isotherm according to fig I:45.

Publikationer från Institutionen för Byggnadsteknik vid
Tekniska Högskolan i Lund

Bulletiner

1. Halvorsen, Ulf A. korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner. Lund 1966.
2. Lindblad, Sven. Impact sound characteristics of resilient floor coverings. A study on linear and nonlinear dissipative compliance. Lund 1968.
3. Nielsen, Anders. Byggnadsmaterials reologi. Problemställningar och litteratur. Lund 1968.
4. Nielsen, Anders. Krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Lund 1968.

Interna rapporter

1. Bankvall, Claes G. Principer för teoretisk behandling av konvektionsförloppet i en sluten värmeisolerad konstruktion. Lund 1966.
2. Ahlgren, Lennart. Grundläggande lagar för fuktvandring i porösa byggnadsmaterial. Lund 1966.
3. Ahlgren, Lennart. Uppföljning av uttorkningsförloppet hos golvbeton. Lund 1967.
4. Nielsen, Anders. Orienterande undersökning av krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Lund 1967.
5. Nielsen, Anders. Orienterande undersökning av krypning under uttorkning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Lund 1968.
6. Nielsen, Anders. Lättbetong internationellt sett. Engelska forskningsinstitut. Intryck från London 27-30 maj 1968. Lund 1968.
7. Cronström, Örjan & Forssander, Tom. Undersökning av polyetylenglykolstabiliserat trä. Lund 1968.
8. Åkerlund, Sture. Egentygdens inverkan på brottrisken - några räkneexempel. Lund 1968.
9. Grönqvist, Nils-Ove. Utmattningshållfasthet hos armeringsstänger. Lund 1968.
10. Grönqvist, Nils-Ove. Statisk hållfasthet hos armeringsstänger tidigare utsatta för pulserande last. Lund 1969.

Rapporter

11. Bankvall, Claes G. Temperaturbestämning och värmeisole-

- ringsundersökning genom strålningsmätning. Byggnads-
tekniska tillämpningar av IR-kameran. Lund 1969.
12. Bankvall, Claes G. Research in heat transfer. Lund 1969.
 13. Bankvall, Claes G. Porositet och porstorleksfördelning. Metoder att studera och kvantifiera porositet och porstorleksfördelning. Lund 1969.
 14. Bankvall, Claes G. Ensidig, evakuerbar och roterbar plattapparat för värmeisoleringsundersökningar. Lund 1970.
 15. Bankvall, Claes G. Värmetransport i fibrösa material. Lund 1970.
 16. Sandberg, Per Ingvar. Icke stationär fukttransport. Beräkningar med dator. Lund 1970.
 17. Åkerlund, Sture. Säkerhetsproblem vid takkonstruktioner av trä. Textdel och figurdel. Lund 1970.
 18. Jonasson, Hans. The propagation of sound over ground with and without acoustic barriers. Lund 1971.
 19. Bomberg, Mark. Water flow through porous materials. Part 1: Methods of water transport measurements. Lund 1971.
 20. Bomberg, Mark. Water flow through porous materials. Part 11: Relative suction model. Lund 1971.
 21. Bomberg, Mark. Water flow through porous materials. Part 111: Applications of the relative suction model. Lund 1972.
 22. Beständighet, reologi, fukt. En redovisning till Statens Råd för Byggnadsforskning över forskningen vid avd. byggnadsmateriallära, LTH åren 1968-1971. Lund 1971.
 23. Hellsten, Mikael & Toolanen, Bengt. Trä impregnerat med polyetylenglykol och melaminharts. Lund 1971.
 24. Snödjup och vattenvärde. Lund 1971.
 25. Bankvall, Claes G. Värmetransport i fiberisolerade konstruktioner. Den naturliga konvektionens betydelse. Lund 1971.
 26. Fagerlund, Göran. Samband mellan porositet och materials mekaniska egenskaper. Lund 1972.
 27. Sandberg, Per Ingvar. Samtidig ångdiffusion och luftströmning genom ett poröst material. Lund 1971.
 28. Nilsson, Leif. Utredning och förslag till provningsmetoder för korrugerade takplattor av asbestcement. Lund 1971.
 29. Samband mellan struktur och egenskaper hos byggnadsmaterial. Lund 1972.
 30. Under publicering.
 31. Degerman, Tryggve. Gipsregelväggars funktion som vindstabiliserande element. Krafter och deformationer vid

- lastupptagning genom skivverkan i gipsplattor. Lund 1972.
32. Boija, Jan, Larsson, Per-Robert & Sandberg, Bengt. Egenskapernas variation med djupet hos ensidigt vakuumbehandlade plattor av stor tjocklek. Lund 1972.
 33. Under publicering.
 34. Under publicering.
 35. Bodlund, Kaj. Punkt-till-punkt korrelation i efterklangsrum och i väggar monterade i reduktionstalslaboratorium. Lund 1972.
-