TEKNISK RAPPORT · TECHNICAL REPORT 342 · 1995

ISSN 0908-3871

Bestemmelse af kritisk vandindhold og vandindhold ved kapillarmætning og vacuumvandmætning for tre norske stenprøver

Kenneth Strømdahl

Bestemmelse af kritisk vandindhold og vandindhold ved kapillarmætning og vacuumvandmætning for tre norske stenprøver

Kenneth Strømdahl

November 1995

Sammenfatning

Rapporten indeholder en gennemgang af hvordan materiale-parametrene vandindhold efter kapillarmætning, vandindhold efter vacuumvandmætning og kritisk vandindhold bestemmes. Undersøgelsen omfatter tre stenprøver, lerholdig sandsten, biotitgranit og rombeporfyr.

Vandindholdet ved kapillarmætning og vacuumvandmætning er blevet bestemt med udgangspunkt i laboratoriets standardiserede prøvemetode. Ved kapillarmætning stilles prøvelegemet neddyppet nogle få mm i vand, og sammenhørende værdier af tid og masse måles indtil ligevægt, hvorefter vandindholdet beregnes. Ved vacuum-vandmætning evakueres prøvelegemet i ekssikkator.Der ledes vand ind til prøvelegemet er dækket, hvorefter det henstår under vacuum i mindst 1 time, og derefter ved alm. atmosfæretryk til næste dag. Herefter beregnes vandindholdet.

Det kritiske vandindhold bestemmes ved at vandmætte prøvelegemet og dernæst udtørre det med og uden vindpåvirkning, idet prøvelegemets masse løbende registreres. Med efterfølgende optegning af udtørringshastigheden G som funktion af det tilbageværende vandindhold ψ, kan det kritiske vandindhold aflæses i det tilhørende diagram. Der er anvendt en datalogger til at foretage vægtaflæsninger under udtørringen.

Forsøgene har ført frem til følgende resultater for de tre stenprøver.

Prøvelegeme		Lerholdig sandsten	Biotit-granit	Rombe-porfyr
Vandindhold ved kapillarvandmætning	vol. %	**0,963**	**2,819**	**0,863**
Vandindhold ved vacuumvandmætning	vol. %	**1,038**	**3,485**	**1,409**
Kritisk vandindhold	vol. %	**0,52**	**2,73**	**0,80**

De tre materialer har en densitet ρ_d på ca. 2700 kg/m^3 som betyder, at de har en lille porøsitet, og dermed en meget ringe evne til at suge vand til sig fra omgivelserne. Vandindholdet ved kapillarmætning giver det mest realistiske tal på materialernes evne til at opsuge vand ved anvendelse i bygningskonstruktioner.

Indholdsfortegnelse

Indledning 2
Teori 2
Forsøgsplanlægning 11
Resultater 15
Konklusion 18
Symbolliste 19
Litteraturfortegnelse 20

Bilagsfortegnelse

Beregning af porøsitet og densitet ..... Bilag 1
Beregning af vandindhold efter kapillarvandmætning .... Bilag 2
Beregning af vandindhold efter vacuumvandmætning .... Bilag 3
Kurver for bestemmelse af kritisk vandindhold ..... Bilag 4
LBM prøvemetode 1/89 ..... Bilag 5
LBM prøvemetode 2/92 ..... Bilag 6

Indledning

Formål

Rapporten beskriver en undersøgelse af nogle norske stenprøver med formålet at bestemme vandindholdet ved kapillarvandmætning, vandindholdet ved vacuumvandmætning og det kritiske vandindhold ψ_c. Prøvematerialet er 3 typer sten, lerholdig sandsten, biotitgranit og rombeporfyr.

Teori

Vandindhold ved kapillarmætning

Når vandindholdet ved kapillarmætning skal bestemmes anbringes prøvelegemet i kontakt med vand så vandet suges ind ved kapillarsugning (hårrørsvirkning). Kapillarsugningen skyldes at vandet væder materialet, og der dannes menisker som trækker vandet ind i materialets indbyrdes forbundne porer /3/.

Når materialet ikke længere suger vand er der indtrådt ligevægt og vandindholdet ψ kan bestemmes ved at veje prøvelegemet i kapillarmættet tilstand og efter tørring ved 70° C.

Vandindholdet bestemmes af:

$$\psi = \frac{\rho_d \cdot u}{\rho_w} \qquad (1)$$

ψ	volumenrelateret vandindhold	$[m^3/m^3]$
ρ_d	tørdensiteten af prøvelegemet	$[kg/m^3]$
ρ_w	densiteten af vand	$[kg/m^3]$
u	vand-tørstofforholdet	[kg/kg]

Tørdensiteten, ρ_d, af prøvelegemet bestemmes ved hjælp af laboratoriets standardiserede prøvemetode /LBM-prøvemetode 2/92/, se bilag 6, hvor prøvelegemet bl.a. vacuumvandmættes og vejes under vand.

Vands densitet, ρ_w, bestemmes ved tabelopslag svarende til temperaturen (20 °C).

Vand-tørstofforholdet bestemmes ud fra:

$$u = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \qquad (2)$$

u	vand-tørstofforholdet	[kg/kg]
m_1	massen af prøvelegemet i våd tilstand	[kg]
m_2	massen af prøvelegemet efter udtørring ved 70 °C	[kg]

Vandindhold ved vacuummætning

Vandindholdet ved vacuummætning bestemmes ved en fuldstændig mætning af prøvelegemet med anvendelse af vacuum.

Prøvelegemet udtørres først i ovn ved 70 °C indtil vægtkonstans. Vægtkonstans regnes at gælde, når prøvelegemets masse ikke ændrer sig mere end 0,1 % i løbet af 4 timer. Dernæst evakueres det i ekssikkator ved så lavt vacuum som muligt i mindst 3 timer for at trække mest muligt luft ud af prøvelegemet.

Efter evakueringen ledes vand ind, som på grund af undertrykket skulle kunne vandmætte prøvelegemet fuldstændigt. Prøvelegemet skal dækkes helt med vand. Ved at evakuere prøvelegemet til vands damptryk i minimum 1 time og derefter lukke luft ind og lade prøvelegemet stå i vandet til næste dag skulle den bedst mulige vandmætning være nået.

Prøvelegemet vejes og vandindholdet bestemmes som for kapillarmætning anført.

Ved at veje det vandmættede prøvelegeme *under* vand er det endvidere muligt at bestemme prøvelegemets porøsitet, p, og densitet, ρ_d.

Kritisk vandindhold

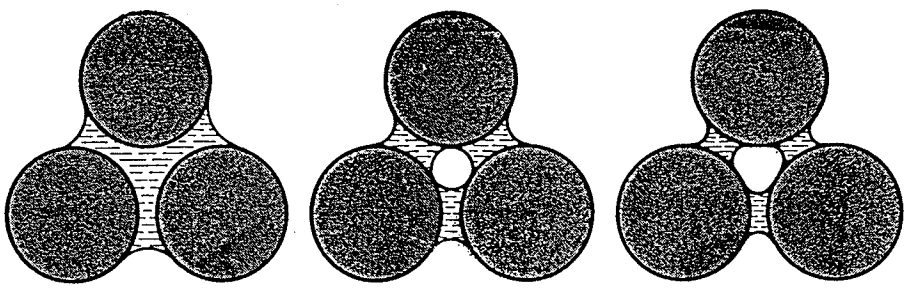
Inden det forklares, hvorledes det kritiske vandindhold bestemmes, skal først anføres hvilke mekanismer der har indflydelse på, hvornår det kritiske vandindhold nås i et materiale.

Lad os forestille os udtørring af sand. Efter nogen tid vil det øverste lag være tørt, og den resterende del fugtig. Mellem de to lag er der en tydelig grænselinie. Skønt der er en udpræget forskel i vandindholdet vil der ikke ske nogen fugttransport i væskeform. Vi må således formode, at under et vist vandindhold, det **kritiske vandindhold,** ψ_c, *vil der ikke foregå nogen fugttransport i væskeform* i porøse materialer. Årsagen kan forklares på to måder /1/.

Kritisk vandindhold mellem kugler

Ved at betragte et porøst materiale opbygget af et stort antal små tætpakkede kugler vil der mellem disse kugler være et netværk af porer. Som udgangspunkt tages et fugtigt materiale, hvorfra der fjernes vand. Først vil de store porer tømmes og senere vil de mindre porer tømmes, og til sidst vil der kun findes vand i form af dråber.

Vi starter således med et vandfyldt materiale hvor porerne er fyldt op, se *Figur 1a*. Efter nogen udtørring vil der stadig være kontakt mellem vandpartiklerne i poresystemet, se *Figur 1b*, og vandtransport vil stadig være mulig. Hvis yderligere vand fjernes opstår en situation som på *Figur 1c*, hvor de enkelte dråber ikke længere har kontakt med hinanden, og der dannes isolerede partier. Der kan nu ikke længere finde nogen væskestrøm sted gennem materialet, og det kritiske vandindhold, ψ_c, er nået /1/.



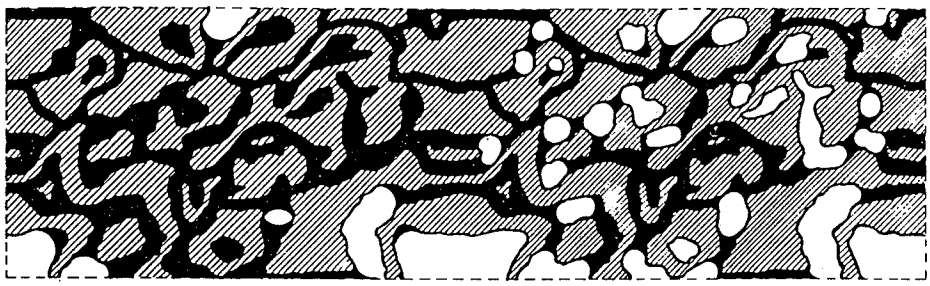
a *b* *c*

Figur 1. Kritisk vandindhold mellem kugler /1/.
a. over kritisk vandindhold
b. eksakt kritisk vandindhold
c. under kritisk vandindhold

Kritisk vandindhold i kapillarstruktur

En anden måde at forklare det kritiske vandindhold på er at tage en model af et porøst materiale og antage, at materialet har et netværk af kapillarer af en vilkårlig form, længde og vilkårlig diameter. I et sådant materiale udvælges to overflader A og B, se *Figur 2*.

A



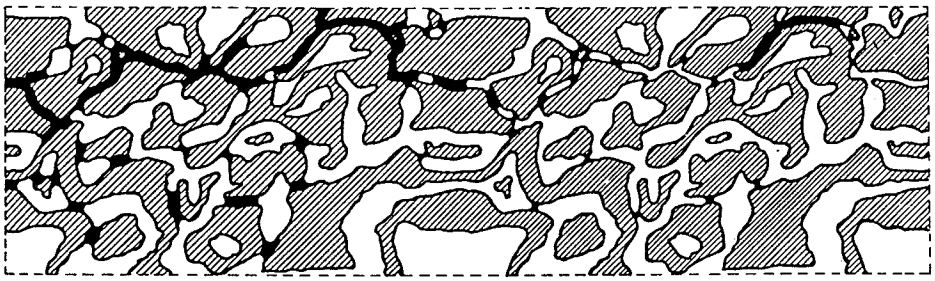
B

Figur 2. Fyldte kapillarer i et porøst materiale. Vandindholdet er over kritisk vandindhold, idet vandet danner et sammenhængende netværk mellem de to overflader A og B /4/.

Mellem de to overflader er der adskillige "kapillarveje" hvor vandet kan strømme fra den ene overflade til den anden. Alle kapillarvejene har hver især en største diameter et sted, og hvis vandindholdet falder, vil der opstå områder disse steder, hvor der ingen vand er. Det skyldes, at de steder hvor den største diameter findes, vil der være det laveste hydrauliske tryk p_h, da det hydrauliske tryk afhænger af radius i poren /3/.

Hvis vandindholdet falder yderligere, vil der være færre og færre kapillarveje til rådighed for væsketransporten, som ophører, når den sidste sammenhæng i de væskefyldte porer er brudt. Det kritiske vandindhold, ψ_c, nås således når væsken i materialet ikke længere danner et sammenhængende netværk, se *Figur 3*.

A



B

Figur 3. Materiale uden sammenhæng i det væskefyldte poresystem mellem overfladerne A og B. Når den sidste sammenhæng i poresystemet brydes er det kritiske vandindhold nået /4/.

Kritisk vandindhold og udtørring

Det kritiske vandindhold, ψ_c, bestemmes her ved at foretage en række udtørringsforsøg af prøvelegemet. Sammenhørende værdier af udtørringshastigheden G og tilbageværende vandindhold ψ optegnes og ved hjælp heraf bestemmes det kritiske vandindhold, ψ_c.

Når udtørringsforløbet for et materiale skal bestemmes er der en række parametre, som har indflydelse på hvorledes udtørringskurven arter sig. Det pågældende materiale har selvsagt stor indflydelse på hvordan forløbet bliver, men derudover betyder omgivelsernes relative fugtighed, omgivelsernes temperatur, materialets vandindhold ved forsøgets start og udtørringshastigheden også noget for udtørringsforløbet /4/.

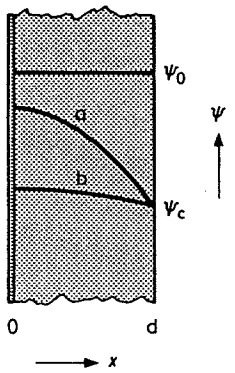
Lad os derfor betragte en ensidig udtørring af et homogent materiale. Det antages at udtørringen foregår isotermt, hvilket næppe er helt korrekt, men det påvirker dog ikke de følgende betragtninger væsentligt. I starten af udtørringsprocessen vil der være vand nok på overfladen, det vil sige over meniskerne, og der vil her være den maksimale vanddampkoncentration (c´) svarende til overfladetemperaturen. Udtørringshastigheden bliver da

$$G = \beta \cdot (c' - c_i) \qquad (3)$$

G	udtørringshastighed	[kg/m^2·s]
β	overfladekoefficienten for vanddamptransport	[m/s]

c' vanddampkoncentration på materialets overflade [kg/m^3]
c_i vanddampkoncentrationen i den omgivende luft [kg/m^3]

Afhængig af porøsiteten falder vandindholdet hurtigt eller langsomt i materialets overflade på grund af fordampningen fra overfladen. Vandindholdsfordelingen i materialet vil være omtrent som vist på *Figur 4* kurve a, hvor vandindholdet ved overfladen i et givet øjeblik vil være blevet så lavt, at kapillarsystemet hvorigennem vandet transporteres bliver afbrudt ved overfladen og vandtilførslen næsten falder til 0. Vandindholdet hvor dette sker, er lig med det kritiske vandindhold, ψ_c, for materialet /4/.

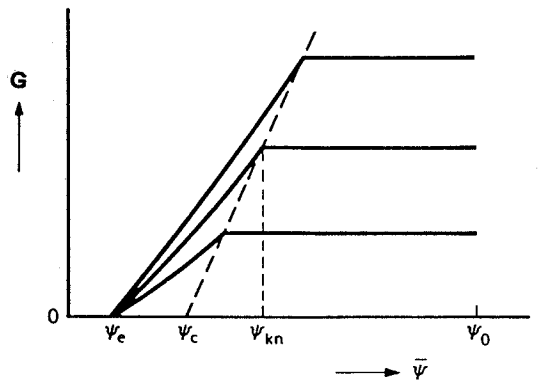


Figur 4. Fordelingen af vandindhold i et materiale under udtørring /4/.
Kurve a: Høj udtørringshastighed på grund af tvungen konvektion.
Kurve b: Lav udtørringshastighed uden tvungen konvektion.

Ved at ændre på udtørringshastigheden, f.eks. gøre den langsommere, vil fugtfordelingen i materialet blive som på *Figur 4* kurve b, hvor fugten inde i materialet falder i næsten samme takt som ved overfladen. Efter et stykke tid vil vandtilførslen til overfladen også her være faldet til næsten 0, og det kritiske vandindhold, ψ_c, nået.

Udtørringskurven

Netop udtørringshastigheden er en af de parametre, det er interessant at ændre på.Man kan fastlægge det kritiske vandindhold ved hjælp af det karakteristiske knæk, som fremkommer på udtørringskurven, og som ved skæring med abcisseaksen giver det kritiske vandindhold, ψ_c. For at bestemme det kritiske vandindhold som skæringen med abcisseaksen skal der foretages mindst to udtørringsforsøg. Som det ses på *Figur 5*, er det ikke den lodrette projektion af knækpunktet på abcisseaksen der angiver det kritiske vandindhold, hvilket indikerer, at forsøget skal foretages med mindst to udtørringshastigheder /1/.



Figur 5. Udtørringshastighed G som en funktion af det tilbageværende vandindhold ψ /4/.

Forløbet af udtørringskurven kan opdeles i to faser, hvor den første fase er fra forsøgets start indtil knækpunktet, og anden fase er fra knækpunktet og indtil forsøget slutter.

I første fase er udtørringskurven tilnærmelsesvis vandret som indikerer at udtørringshastigheden er konstant. Det betyder, at vanddamptransporten ved overfladen er konstant hvilket igen betyder, at vandet transporteres i væskeform fra materialets indre til overfladen. På et tidspunkt vil fugttransporten i væskeform fra materialets indre ikke længere kunne følge med fordampningen fra overfladen af materialet og en stadig større del af fugttransporten vil foregå som diffusion.

På det tidspunkt hvor diffusionen begynder at gøre sig gældende vil udtørringskurven gå ind i anden fase. På grund af den langsommere fugttransport i materialet vil udtørringshastigheden falde brat og det karakteriske knækpunkt fremkommer på kurven.

Beregninger og optegning af kurve

Før en optegning af udtørringshastigheden som funktion af det gennemsnitlige tilbageværende vandindhold kan foretages, er det nødvendigt at lave nogle beregninger på de registrede måledata.

Opsamling af måledata

For at bestemme udtørringsforløbet for prøvelegemet stilles det i våd tilstand på en vægt, tilsluttet en datalogger, og evt. under påvirkning af en ventilator. Ved hjælp af dataloggeren måles sammenhørende værdier af tid og masse for det enkelte prøvelegeme under udtørringen. Dataloggeren opsamler resultaterne i en fil.

Et eksempel på hvorledes en resultatfil kan se ud er afbildet nedenfor.

Resultatfil

Dato	Klokkeslet	Tid [s]	Masse [g]
09-06-1995	13.32.45	0	45.13
09-06-1995	13.47.45	900	45.09
09-06-1995	14.02.45	1800	45.07

osv..

På abcisseaksen afsættes det tilbageværende vandindhold ψ [vol. %]. ψ bestemmes ud fra formel (1) og formel (2).

Ordinataksen

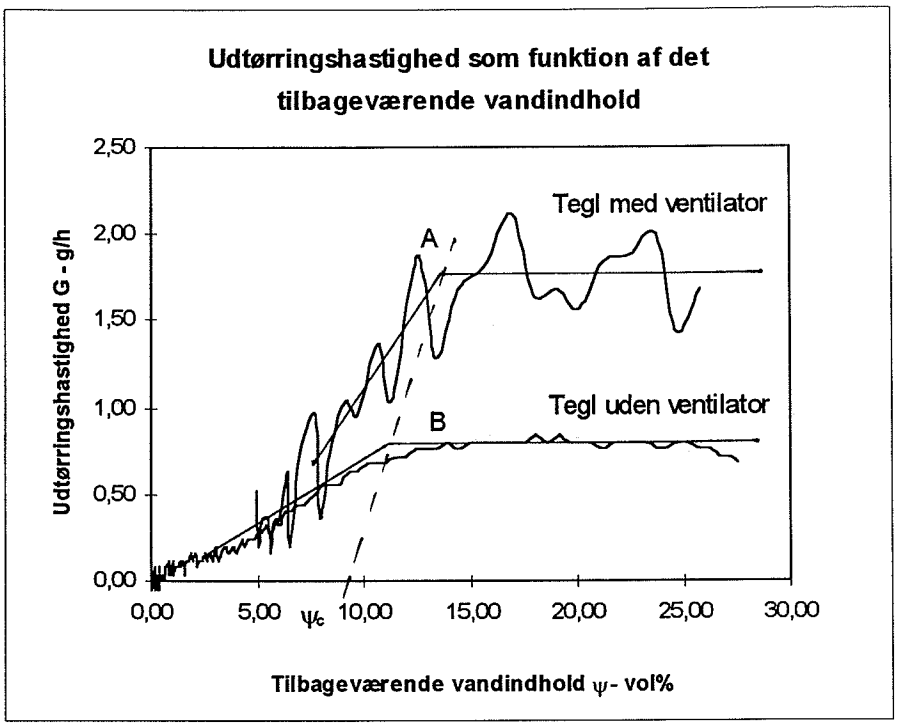
På ordinataksen afsættes udtørringshastigheden G [g/h] (= gram/time), som bestemmes ved hjælp af:

$$G = \frac{m_{t1} - m_{t2}}{(t_2 - t_1)/3600} \qquad (4)$$

G	udtørringshastigheden	[g/h]
m_{t1}	massen af prøvelegemet til tiden t_1	[kg]
m_{t2}	massen af prøvelegemet til tiden t_2	[kg]
t_1	tiden som prøven har stået til udtørring	[sek]
t_2	tiden som prøven har stået til udtørring, idet $t_2 > t_1$	[sek]

Da udtørringsforsøgene hver især tager en del timer at gennemføre bliver datamængderne ganske anseelige og beregningerne må derfor foretages i et regneark.

Et eksempel på en optegnet kurve for udtørringsforløbet for et prøvelegeme er vist i *Figur 6*.



Figur 6. Eksempel på udtørringshastigheden som funktion af det tilbageværende vandindhold for tegl. Ud fra de viste to knækpunkter (A og B) kan det kritiske vandindhold ψ_c aflæses på abcisseaksen.

Forsøgsplanlægning

Forsøgsplanlægningen falder i to dele. Først nogle forforsøg inden prøverne udskæres, og dernæst nogle forsøg hvor prøverne er udskåret.

Forforsøg uden udskæring

Til forforsøgene anvendes prøvelegemerne, som de er leveret.

Vacuumvandmætning og densitetsbestemmelse

Ved beregningen af udtørringskurven er det nødvendigt at have densiteten af prøvelegemerne. Densitetsbestemmelsen foregår ved at vacuumvandmætte prøvelegemet, og efterfølgende veje det under og over vand og sluttelig udtørre det i ovn.

Til en start vacuumvandmættes prøvelegemerne i den form de er blevet leveret i, men efterfølgende, når der er blevet udsavet mindre prøvelegemer, laves der endnu en vacuumvandmætning med tilhørende densitetsbestemmelse.

Tørring

Lav udtørringstemperatur

Efter vacuumvandmætningen skal prøvelegemerne ovntørres ved 105 °C efter forskrifterne, men disse prøvelegemer tørres først ved 30 °C og efter nogle dage hæves temperaturen til 70 °C, der her er den maksimalt anvendte temperatur.

Beskadigelse af porerne

Denne forsigtighed med temperaturen skyldes frygten for, at vandet ikke vil kunne nå at trænge ud gennem porerne og fordampe i takt med opvarmningen. På grund af de meget høje tryk, som skabes af vandet i porerne under opvarmningen, er der mulighed for at ødelægge en del af poresystemet, og dermed gøre prøvelegemerne mindre pålidelige til andre forsøg.

Kapillarsugning

Ujævn sugeflade

For at bestemme materialets evne til at opsuge vand laves kapillarsugning på de enkelte prøvelegemer. Prøvelegemerne bruges i den form, som de har i leveringstilstanden, hvilket gør, at vandet bliver nødt til at stå ca. ½ - 1 cm op af siderne på grund af

ujævnhederne i overfladen og for at sikre, at hele sugefladen har kontakt med vandet.

Efter at prøvelegemerne er udsavet laves endnu en kapillarsugning, hvor sugefladerne er plane og dermed sikrer, at prøvelegemernes sugeflade er i permanent kontakt med vandet under hele forsøget.

Størrelse af prøver

Prøvelegemerne, som skal undersøges, har fra starten en størrelse på mellem en hel og en halv kaffekop, og er meget ujævne i overfladen se *Billede 1*.

Kritisk vandindhold

Det kritiske vandindhold vil ikke kunne bestemmes på en tilfredsstillende måde sålænge prøverne foreligger i leveringstilstanden på grund af den umage form. Det vil ikke være muligt at vindpåvirke prøverne på en ensartet måde og dermed ikke få sammenlignelige resultater.

Forsøg efter udskæring

Udskæringen foregår på følgende måde. Prøvelegemerne saves i mindre stykker og får en højde på ca. 25 mm se *Billede 2*. Når højden vælges til ca. 25 mm skyldes det erfaring med undersøgelse af beton, hvor en sådan prøvestørrelse er passende.

Vacuumvandmætning og densitetsbestemmelse

Hvis der har været eventuelle hulrum i prøverne, som det ikke kunne lade sig gøre at fylde med vand ved forsøget med prøvelegemerne i leveringstilstanden, skulle der efter udskæringen af prøvelegemerne være større chance for at presse vandet ind i alle porerne på grund af den mindre prøvestørrelse.

Når der laves forsøg både før og efter udskæring er det også for at opnå mindst én dobbeltbestemmelse på densiteten.

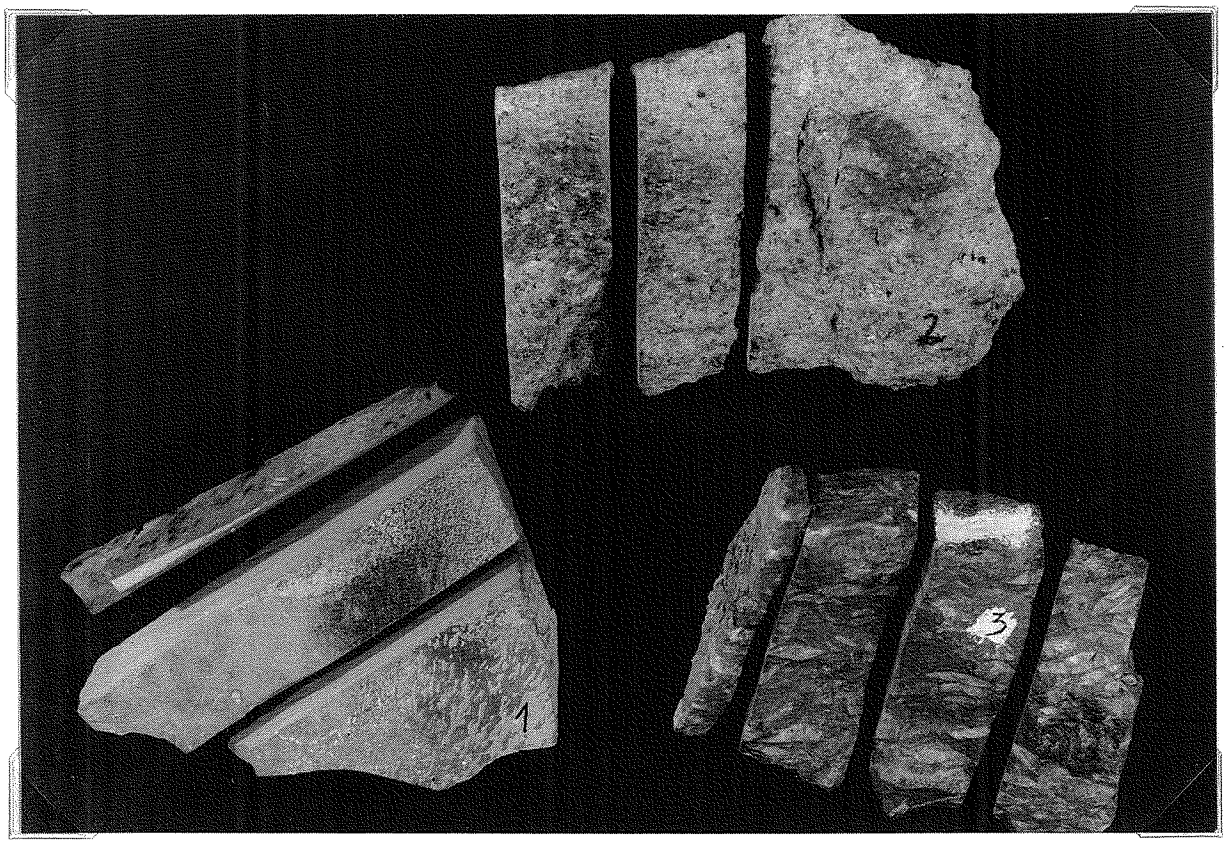
Kapillarsugning

Plan sugeflade

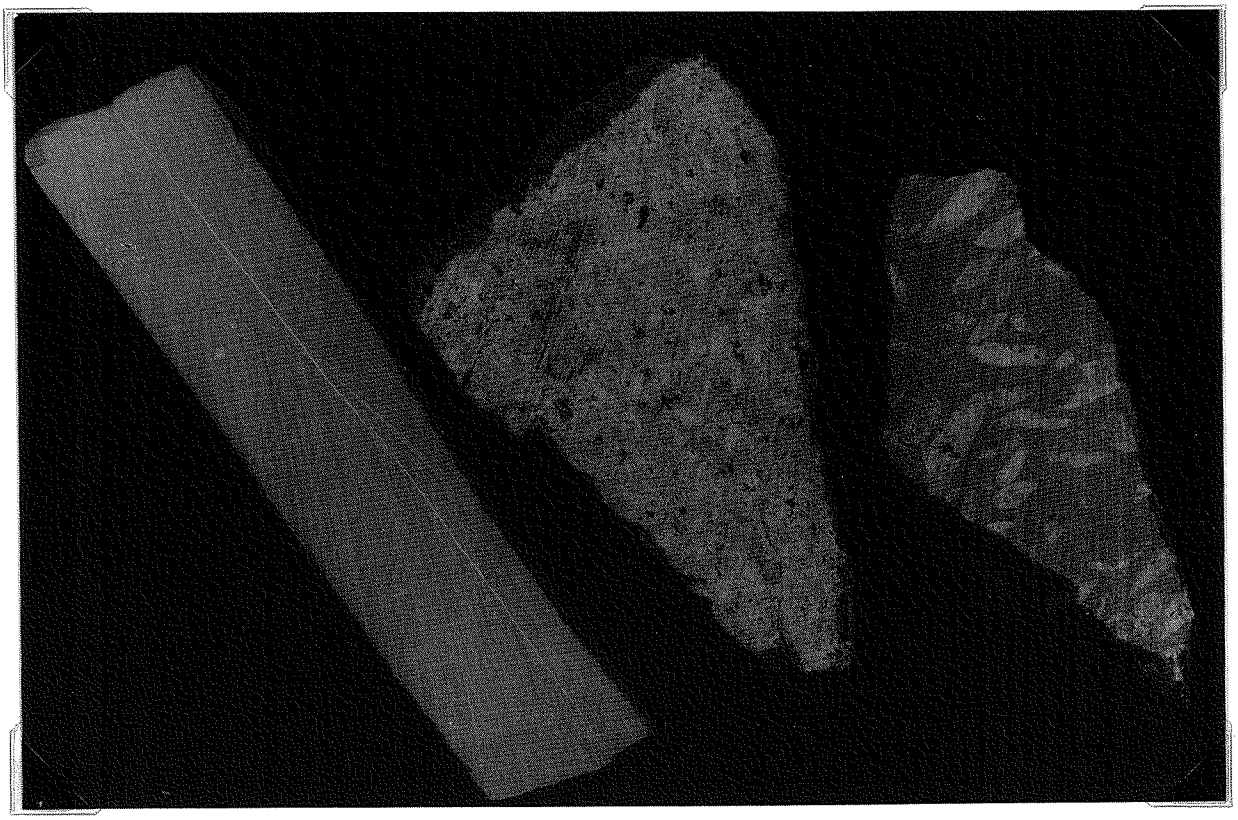
Et andet og bedre resultat for kapillarsugningen opnås ved at save prøvelegemerne plane se *Billede 3*, så sugefladen bliver mere regulær, og vandet kun skal stå de nødvendige få mm op af prøvelegemets side.



Billede 1. Prøvelegemer ved levering.



Billede 2. Prøvelegemer efter udskærring til en højde på 25 mm.



Billede 3: Prøvelegemernes plane flade efter udskæring. Til venstre lerholdig sandsten, i midten biotitgranit, til højre rombeporfyr.

Kritisk vandindhold

Efter udskæringen har prøvelegemerne fået nogenlunde samme facon og størrelse, hvilket gør det muligt at holde samme forsøgsprocedure for alle prøvelegemerne og tilmed kunne sammenligne resultaterne.

Resultater

Densitetsbestemmelse

Densitetsbestemmelsen for de tre typer sten er blevet foretaget efter /LBM-prøvemetode 2/92/, se bilag 6, og beregningerne fra forsøgene kan ses i bilag 1. Da der indgik to prøvelegemer af både biotitgranit og rombeporfyr til densitetsbestemmelsen, er det kun middelværdierne fra forsøget, der er medtaget i *Tabel 1*.

Prøvelegeme		Lerholdig sandsten	Biotit-granit	Rombe-porfyr
$p_{å} = V_{på}/V$	m^3/m^3	0,010	0,035	0,014
$p_{tot} = 1-\rho_d/\rho_f$	m^3/m^3	0,010	0,035	0,014
$\rho_d = m_{70}/V$	kg/m^3	2688	2528	2711

Tabel 1. Fugtparametre, porøsitet og densitet.

Kapillarsugning

For at bestemme prøvelegemernes vandopsugningsevne laves et kapillarsugningsforsøg med hver af prøvelegemerne. Laboratoriets standardiserede prøvemetode anvendes, se bilag 5. Resultaterne og beregningerne fra forsøget kan ses i bilag 2. Gennemsnitsværdier af beregningerne kan ses i *Tabel 2*.

Prøvelegeme		Lerholdig sandsten	Biotit-granit	Rombe-porfyr
$\psi = (\rho_d \cdot u)/\rho_w$	vol. %	0,963	2,819	0,863

Tabel 2. Vandindhold efter kapillarsugning.

Vacuumvandmætning

Vandindholdet efter vacuumvandmætning er blevet bestemt på de samme prøvelegemer som indgår i de andre forsøg. Beregningerne kan ses i bilag 3. Middelværdierne for vandindholdet er angivet i *Tabel 3*.

Prøvelegeme		Lerholdig sandsten	Biotit-granit	Rombe-porfyr
$\psi = (\rho_d \cdot u)/ \rho_w$	vol. %	1,038	3,485	1,409

Tabel 3. Vandindhold efter vacuumvandmætning

Udtørringskurve. Kritisk vandindhold

De målinger som dataloggeren har opsamlet i en fil, behandles i et regneark, dvs. udtørringshastigheden og det tilbageværende vandindhold beregnes og afsættes derefter i et diagram. Den fremkomne kurve er udtørringskurven for den pågældende materialeprøve.

Regneeksempel

I det følgende gennemgås et eksempel på hvorledes hhv. udtørringshastigheden og det tilbageværende vandindhold beregnes. Beregningerne foretages i et regneark /2/. Der tages udgangspunkt i en datafil fra udtørring af en teglsten, som ses i de første fire kolonner i *Tabel 4*.

Dato	Klokkeslet	Tid [s]	Masse [g]	*Tilbagevæ-rende vandindhold* ψ [vol. %]	*Udtørrings-hastighed G [g/h]*
10-03-1995	16.37.15	0	80,55	*26,86*	
10-03-1995	16.52.15	900	80,12	*25,75*	*1,72*
10-03-1995	17.07.15	1800	79,70	*24,67*	*1,68*
10-03-1995	17.22.15	2700	79,34	*23,74*	*1,44*
10-03-1995	17.37.15	3600	78,84	*22,46*	*2,00*
10-03-1995	17.52.15	4500	78,37	*21,25*	*1,88*

Tabel 4. Datafil fra udtørring af teglsten til regneeksempel.

Abcisseaksen

På abcisseaksen afsættes det tilbageværende vandindhold ψ. ψ bestemmes ud fra formel (1) og formel (2).

Vand-tørstofforholdet bestemmes ud fra tallene i *Tabel 4*, idet massen af prøvelegemet efter udtørring er $m_2 = 70,11$ g:

$$u = \frac{m_1 - m_2}{m_2} = \frac{80,12 - 70,11}{70,11} = 0,143 \qquad (2)$$

Med ρ_d = 1800 kg/m^3 kan det tilbageværende vandindhold beregnes:

$$\psi = \frac{\rho_d \cdot u}{\rho_w} = \frac{1800 \cdot 0{,}143}{998} \cdot 100 = 25{,}75\ vol.\% \qquad (1)$$

Ordinataksen

På ordinataksen afsættes udtørringshastigheden G [g/h] som bestemmes ved hjælp af:

$$G = \frac{m_{t1} - m_{t2}}{(t_2 - t_1)/3600} = \frac{80{,}55 - 80{,}12}{(900 - 0)/3600} = 1{,}72 \qquad (4)$$

På grundlag af de beregnede resultater optegnes en udtørringskurve for det pågældende materiale, se *Figur 6*.

Kritisk vandindhold

De optegnede kurver til bestemmelse af det kritiske vandindhold for de tre forskellige materialer er vist i bilag 4. På hvert diagram er optegnet udtørringskurven for forsøg med og uden ventilator. Den stiplede linie, knækpunktslinien, bestemmer værdien af det kritiske vandindhold for det enkelte prøvelegeme.

For den lerholdige sandsten foreligger ét diagram, mens der for hhv. biotitgranit og rombeporfyr foreligger to diagrammer svarende til at der er udsavet et prøvelegeme for den lerholdige sandsten og to for hhv. biotitgranit og rombeporfyr.

Alle forsøgene er udført i et lokale med en relativ fugtighed (RF) på 40 % og en temperatur (T) på 27 °C. Inden hvert forsøg er prøvelegemerne blevet vacuumvandmættet.

I *Tabel 5* ses værdierene for det kritiske vandindhold for de tre forskellige materialer.

Materiale	Kritisk vandindhold ψ_c	Kritisk vandindhold, $\psi_{c,\ middel}$
	vol. %	vol. %
Lerholdig sandsten	0,52	**0,52**
Biotitgranit, prøve 1	2,80	
Biotitgranit, prøve 2	2,65	**2,73**
Rombeporfyr, prøve 1	1,15[1)]	
Rombeporfyr, prøve 2	0,80	**0,80**

[1)] *Fejlbehæftede målinger, da ψ_c ikke kan være større end vandindholdet ved kapillarmætning.*

Tabel 5. Kritisk vandindhold bestemt ved udtørringsforsøg med forskellig vindhastighed.

Konklusion

Forsøgene har ført frem til følgende resultater for de tre stenprøver.

Prøvelegeme		Lerholdig sandsten	Biotit-granit	Rombe-porfyr
Vandindhold ved kapillarvandmætning	vol. %	**0,963**	**2,819**	**0,863**
Vandindhold ved vacuumvandmætning	vol. %	**1,038**	**3,485**	**1,409**
Kritisk vandindhold	vol. %	**0,52**	**2,73**	**0,80**

Symbolliste

G	Udtørringshastighed
ρ_d	Tørdensiteten
ρ_f	Faststofdensiteten
ρ_w	Vands densitet
ρ_{ssd}	Densitet i vacuumvandmættet overfladetør tilstand
u	Vand-tørstofforholdet
u_{ssd}	Vand-tørstofforholdet i vacuumvandmættet overfladetør tilstand
φ	Relativ fugtighed
RF	Relatig fugtighed
ψ	Volumenrelateret vandindhold
ψ_c	Volumenrelateret vandindhold, kritisk
p_h	Hydraulisk tryk
β	Overfladekoefficienten
c'	Vanddampkoncentrationen på materialets overflade
c_i	Vanddampkoncentrationen i den omgivende luft
m_1	Masse af prøvelegeme i starttilstanden
m_{70}	Masse af prøvelegeme efter tørring ved 70 °C
m_{ssd}	Masse af vacuumvandmættet prøvelegeme i overfladetør tilstand
m_{sw}	Masse af vacuumvandmættet prøvelegeme vejet under vand
V	Prøvelegemets volumen
$V_{på}$	Volumen af åbne porer
t	Tid
$p_å$	Åben porøsitet
p_{tot}	Totalporøsitet

Litteraturfortegnelse

/1/ Vos, B.H.: **Kondensation i bygningsdele**. Dansk oversættelse af "Condensation in Structures", Report No. BI-67-33/23p14. Head, heat- and moisture Transport Division, Institute TNO for Building Materials and Building Structures. Oversat af SBI, Afd. for Bygningsfysik, 1969.

/2/ Straaberg, Carsten et al.: **Excel 5.0 - illustreret håndbog**. Forlaget Globe 1994.

/3/ Herholdt, Aage D. et al.: **Beton-Bogen.** Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, Aalborg Portland. 2. udgave 1985.

/4/ Tammes, E.; Vos, B.H.: **Varmte- en vochttransport in bouwconstructies**. Kluwer Technische Boeken B.V. - Deventer - Antwerpen, 1980.

Beregning af porøsitet og densitet

Forsøg udført den 19/7 1995

Prøvelegeme		Lerholdig-sandsten	Biotitgranit prøve 1	Biotitgranit prøve 2
m_1 (start)	kg	0,18180	0,15872	0,18035
m_{70}	kg	0,18169	0,15842	0,18007
ρ_w ved 20 ° C	kg/m^3	998,2	998,2	998,2
m_{ssd}	kg	0,18239	0,16066	0,18248
m_{sw}	kg	0,11493	0,09803	0,11148
$u = (m_1 - m_{70})/m_{70}$	kg/kg	0,00061	0,00189	0,00155
u_{middel}	kg/kg	0,00061		0,00172
$V = (m_{ssd} - m_{sw})/ \rho_w$	m^3	6,76E-05	6,27E-05	7,11E-05
$V_{på} = (m_{ssd} - m_{70})/\rho_w$	m^3	7,01E-07	2,24E-06	2,41E-06
$p_å = V_{på}/V$	m^3/m^3	0,0104	0,0358	0,0339
$\rho_d = m_{70} /V$	kg/m^3	2688	2525	2532
$\rho_{d, middel}$	kg/m^3	**2688**		**2528**
$\rho_f = m_{70}/(V - V_{på})$	kg/m^3	2717	2619	2621
$\rho_{ssd} = m_{ssd}/V$	kg/m^3	2699	2561	2566
$u_{ssd} = (m_{ssd} - m_{70})/m_{70}$	kg/kg	0,0039	0,0141	0,0134
$p_{tot} = 1-\rho_d/\rho_f$	m^3/m^3	0,0104	0,0358	0,0339
$p_{tot, middel}$	m^3/m^3	0,0104		0,0349

Beregning af porøsitet og densitet

Forsøg udført den 19/7 1995

Prøvelegeme		Rombeporfyr, prøve 1	Rombeporfyr, prøve 2
m_1 (start)	kg	0,13751	0,13648
m_{70}	kg	0,13737	0,13635
ρ_w ved 20 ° C	kg/m^3	998,2	998,2
m_{ssd}	kg	0,13814	0,13700
m_{sw}	kg	0,08740	0,08695
$u = (m_1 - m_{70})/m_{70}$	kg/kg	0,00102	0,00095
u_{middel}	kg/kg		0,00099
$V = (m_{ssd} - m_{sw})/ \rho_w$	m^3	5,08E-05	5,01E-05
$V_{på} = (m_{ssd} - m_{70})/\rho_w$	m^3	7,71E-07	6,51E-07
$p_å = V_{på}/V$	m^3/m^3	0,0152	0,0130
$\rho_d = m_{70} /V$	kg/m^3	2702	2719
$\rho_{d,\ middel}$	kg/m^3		**2711**
$\rho_f = m_{70}/(V - V_{på})$	kg/m^3	2744	2755
$\rho_{ssd} = m_{ssd}/V$	kg/m^3	2718	2732
$u_{ssd} = (m_{ssd} - m_{70})/m_{70}$	kg/kg	0,0056	0,0048
$p_{tot} = 1-\rho_d/\rho_f$	m^3/m^3	0,0152	0,0130
$p_{tot,\ middel}$	m^3/m^3		0,0141

Beregning af vandindhold efter kapillarvandmætning

Prøvelegeme		Lerholdig-sandsten	Biotitgranit prøve 1	Biotitgranit prøve 2
ρ_d	kg/m^3	2688	2528	2528
m_1 (m_{ssd})	kg	0,18236	0,16029	0,18202
m_2 (m_{70})	kg	0,18171	0,15846	0,18009
$u = (m_1 - m_2)/m_2$	vægt %	0,35771	1,15487	1,07169
$\psi = \rho_d \cdot u/\rho_w$	vol. %	0,9633	2,2947	2,7141
ψ_{middel}	vol. %	**0,9633**		**2,8194**

Prøvelegeme		Rombeporfyr, prøve 1	Rombeporfyr, prøve 2
ρ_d	kg/m^3	2711	2711
m_1 (m_{ssd})	kg	0,13787	0,13681
m_2 (m_{70})	kg	0,13742	0,13639
$u = (m_1 - m_2)/m_2$	vægt %	0,32746	0,30794
$\psi = \rho_d \cdot u/\rho_w$	vol. %	0,8893	0,8363
ψ_{middel}	vol. %		**0,8628**

Beregning af vandindhold efter vacuumvandmætning

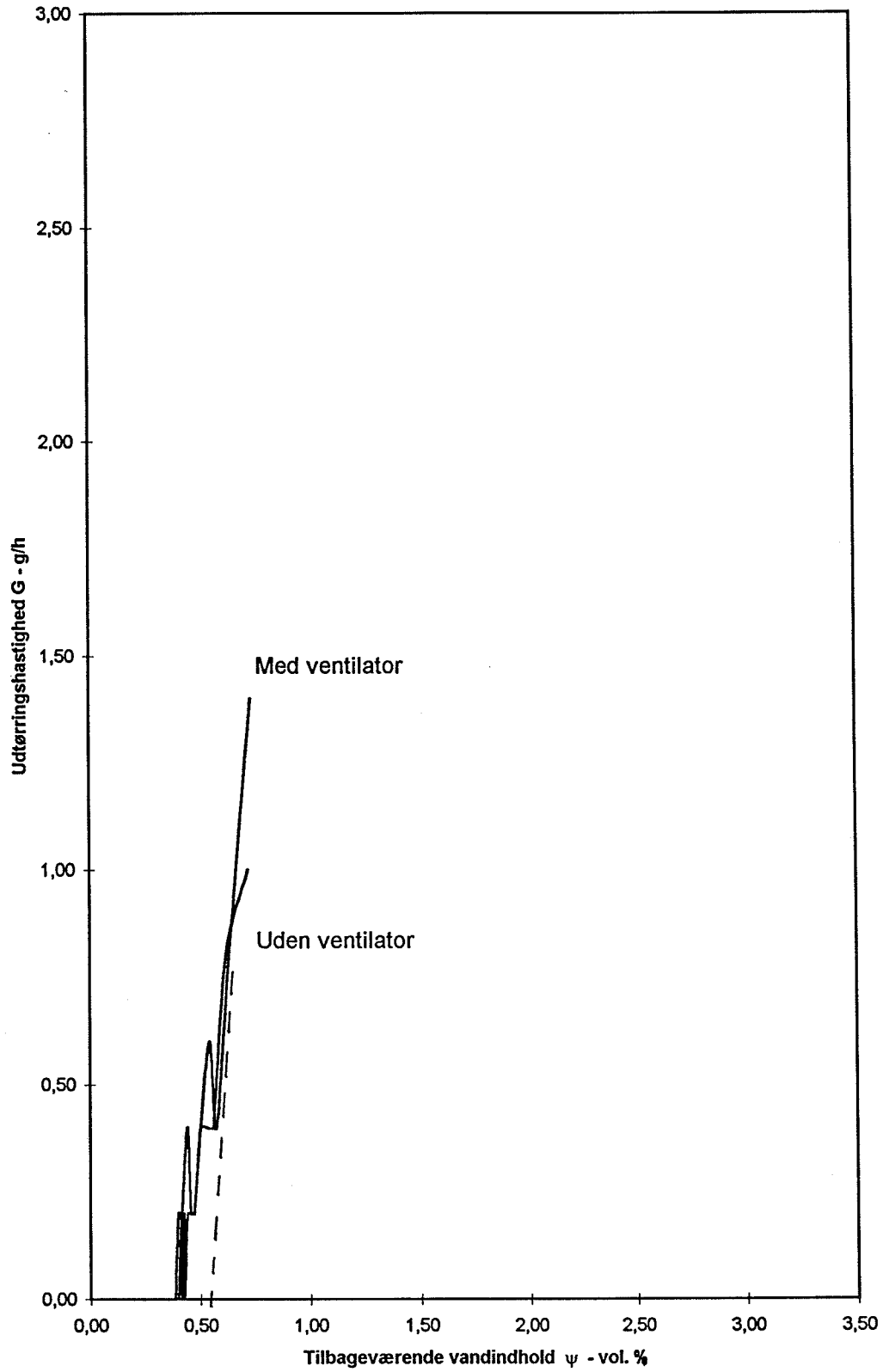
Prøvelegeme		Lerholdig-sandsten	Biotitgranit prøve 1	Biotitgranit prøve 2
ρ_d	kg/m^3	2688	2528	2528
m_1 (m_{ssd})	kg	0,18239	0,16066	0,18248
m_2 (m_{70})	kg	0,18169	0,15842	0,18007
$u = (m_1 - m_2)/m_2$	vægt %	0,38527	1,41396	1,33837
$\psi = \rho_d \cdot u/\rho_w$	vol. %	1,0375	3,5809	3,3895
ψ_{middel}	vol. %	**1,0375**		**3,4852**

Prøvelegeme		Rombeporfyr, prøve 1	Rombeporfyr, prøve 2
ρ_d	kg/m^3	2711	2711
m_1 (m_{ssd})	kg	0,13814	0,13700
m_2 (m_{70})	kg	0,13737	0,13635
$u = (m_1 - m_2)/m_2$	vægt %	0,56053	0,47671
$\psi = \rho_d \cdot u/\rho_w$	vol. %	1,5223	1,2947
ψ_{middel}	vol. %		**1,4085**

Materiale: Lerholdig sandsten
Udtørring: Flersidig udtørring med og uden ventilator.
Starttilstand: Vacuumvandmættet, RF 40 %, T 27 °C

Bilag 4

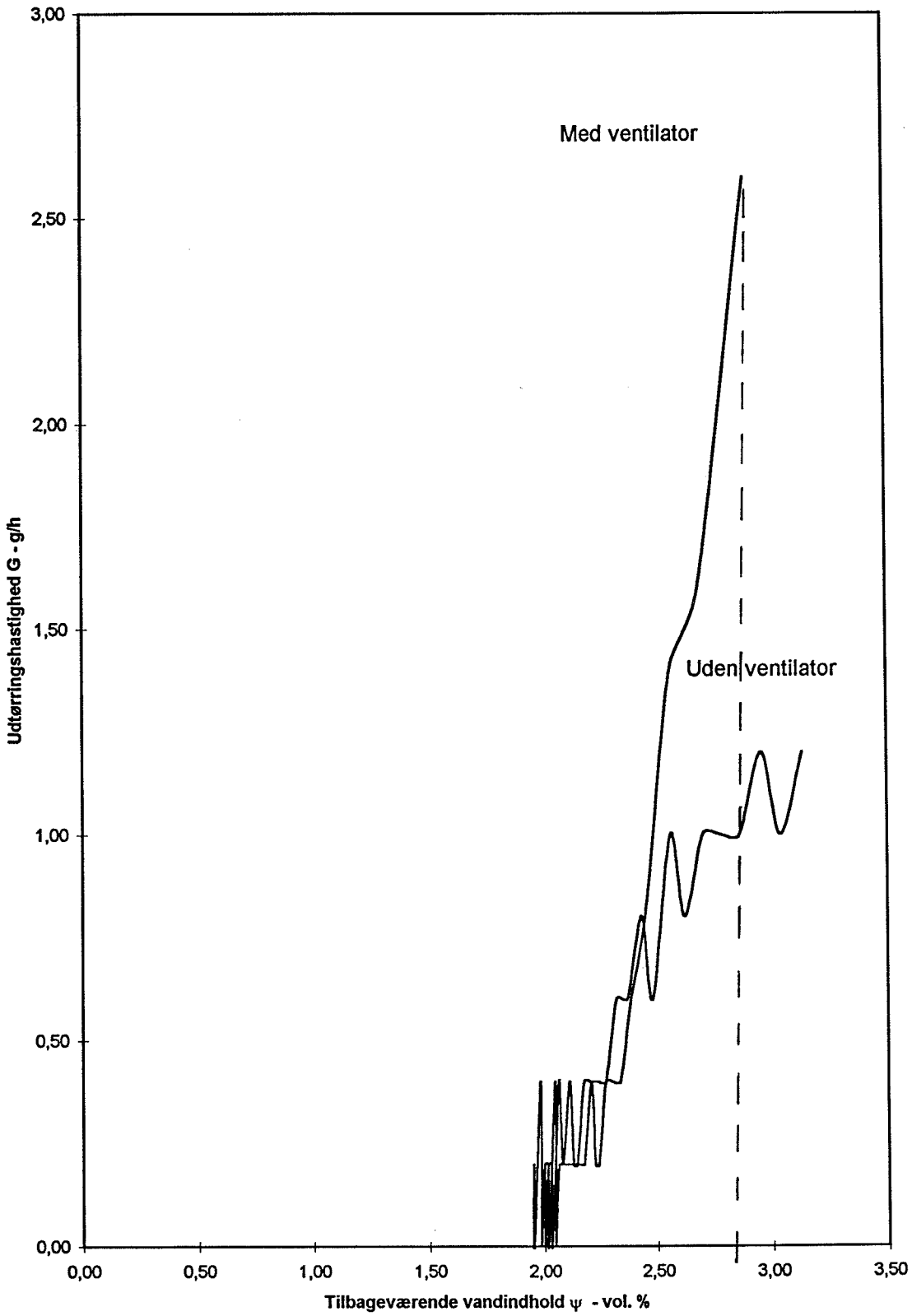
Udtørringshastighed som funktion af det tilbageværende vandindhold



20-11-1995

Materiale: Biotitgranit prøve 1
Udtørring: Flersidig udtørring med og uden ventilator.
Starttilstand: Vacuumvandmættet, RF 40 %, T 27 °C

Udtørringshastighed som funktion af det tilbageværende vandindhold

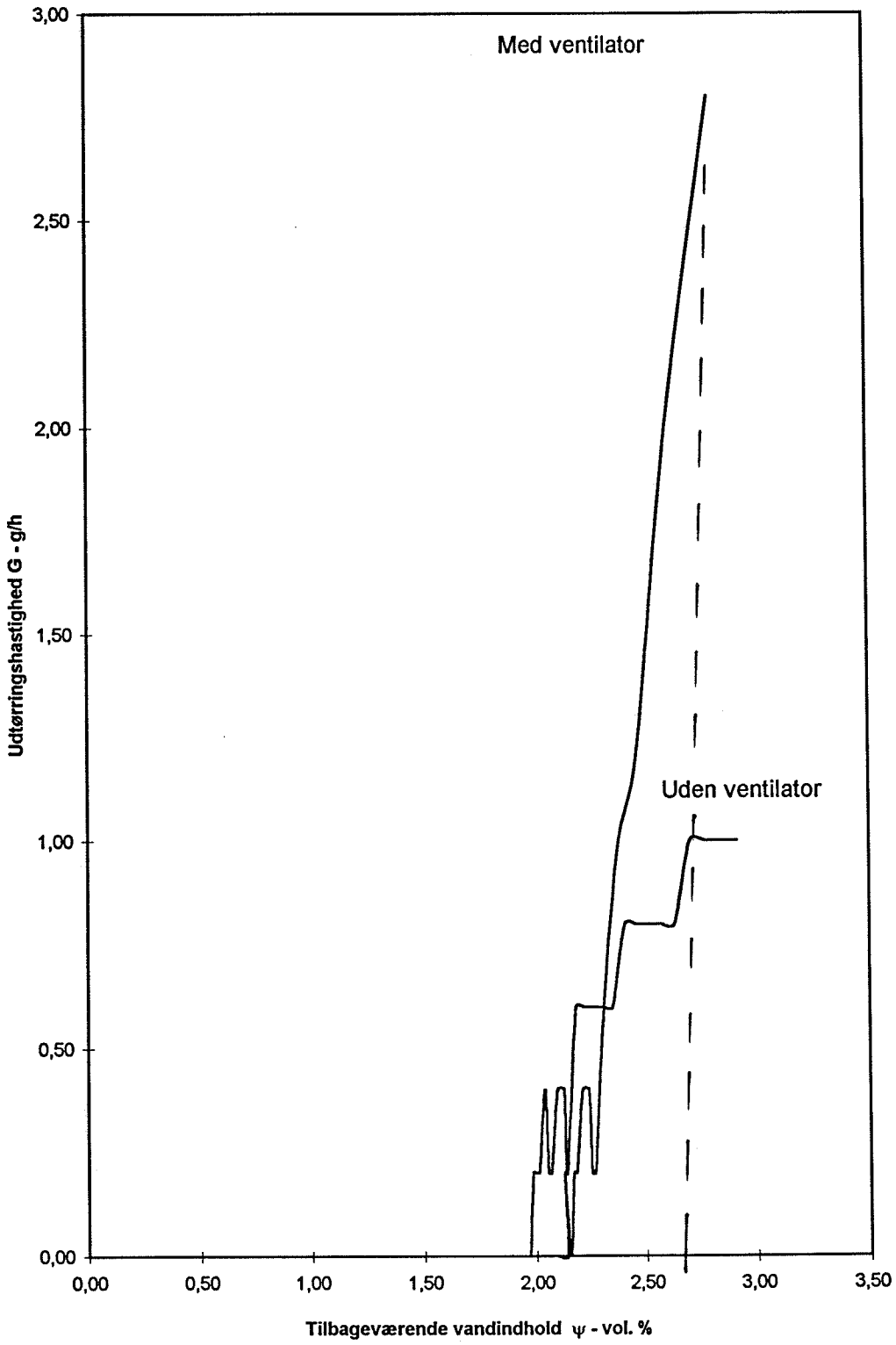


20-11-1995

Materiale: Biotitgranit prøve 2
Udtørring: Flersidig udtørring med og uden ventilator.
Starttilstand: Vacuumvandmættet, RF 40%, T 27 °C

Bilag 4

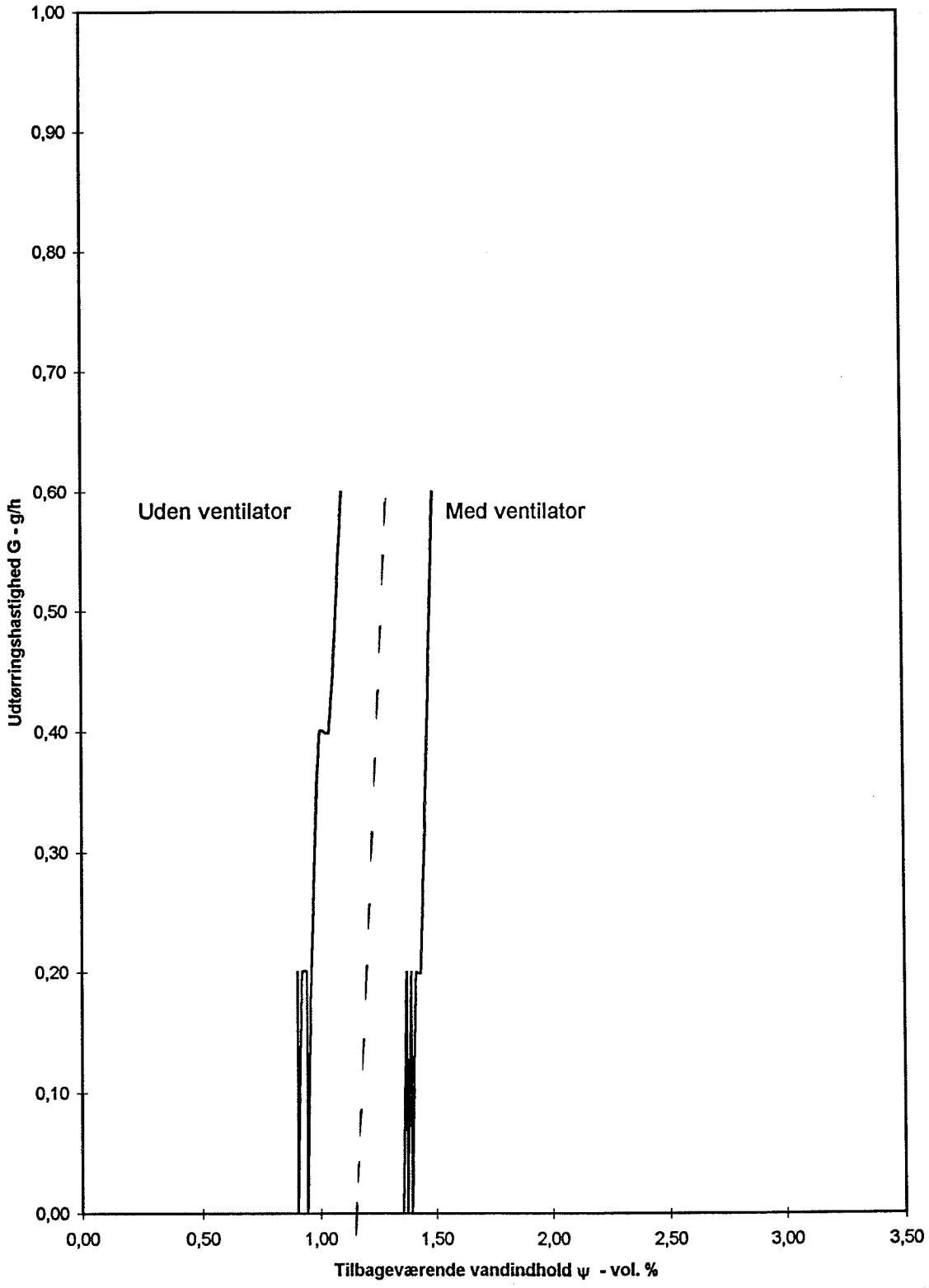
Udtørringshastighed som funktion af det tilbageværende vandindhold



20-11-1995

Materiale: Rombeporfyr prøve 1
Udtørring: Flersidig udtørring med og uden ventilator.
Starttilstand: Vacuumvandmættet, RF 40 %, T 27 °C

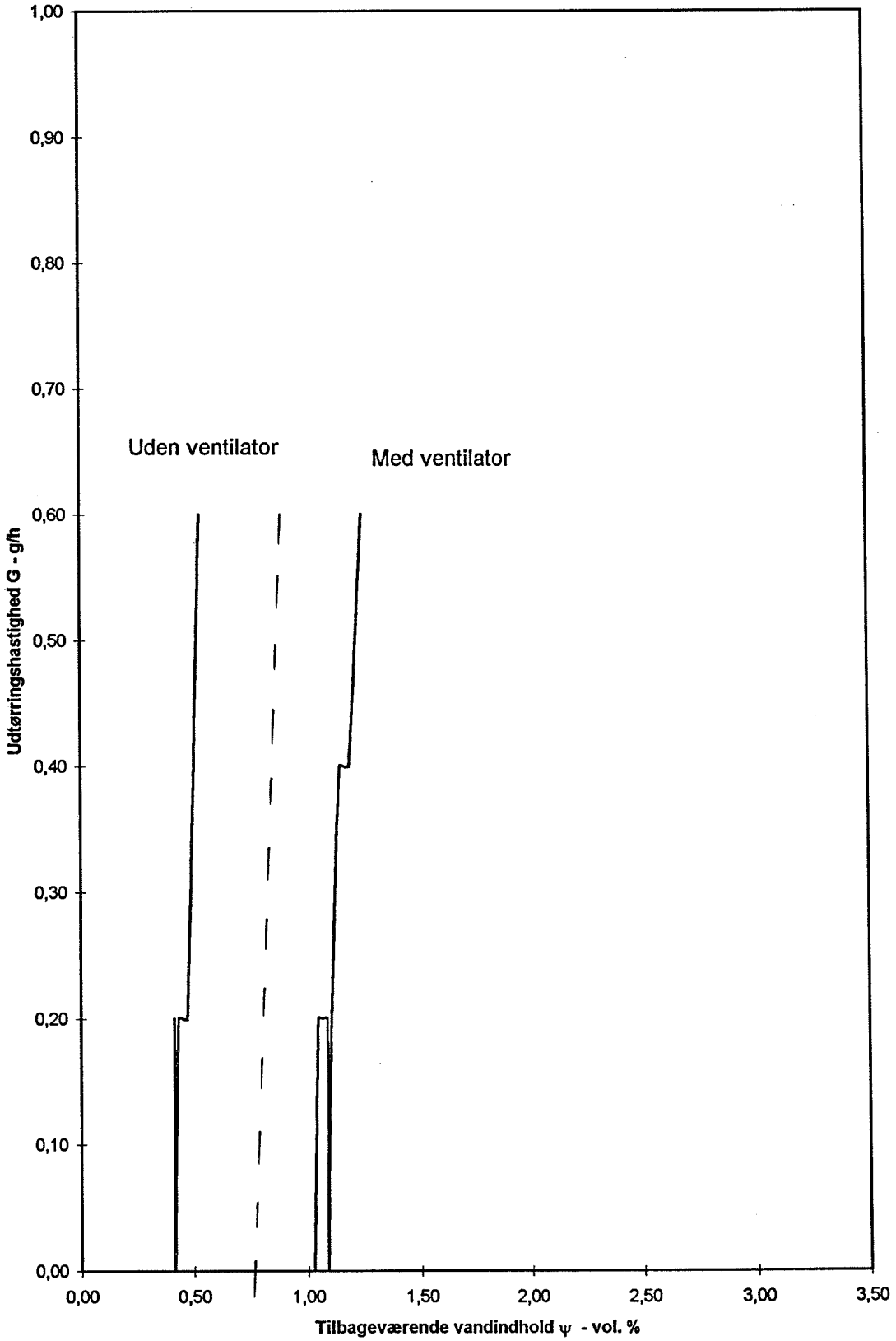
Udtørringshastighed som funktion af det tilbageværende vandindhold



20-11-1995

Materiale: Rombeporfyr prøve 2
Udtørring: Flersidig udtørring med og uden ventilator.
Starttilstand: Vacuumvandmættet, RF 40 %, T 27 °C

Udtørringshastighed som funktion af det tilbageværende vandindhold



20-11-1995

LBM	KAPILLARSUGNING LBM-prøvemetode 1	6108/14, side 1 170189 CBN:sl

Anvendelsesområde

Metoden anvendes til for et uorganisk, porøst materiale såsom beton, tegl og gasbeton at bestemme vandopsugningsevne og sugehastighed.
Metoden kan eventuelt kombineres med LBM-prøvemetode 2.

Referencer

Metoden er en bearbejdet udgave af metode TI-B-25 fra Teknologisk Institut, Byggeteknik, 1983. Denne baserer sig på en RILEM Standard udgivet i Materiaux et Constructions Vol. 10, nr. 58. Kapillarsugning er omtalt i Beton-Bogen, 1985, side 199 ff og side 629 ff.

Definitioner, begreber og symboler

Vægtkonstans regnes at gælde, når prøvelegemets masse ikke ændrer sig mere end 0,1% i løbet af 4 timer.

m_o	(kg)	Masse af prøvelegeme før forsøget
m_{50}	(kg)	Masse af prøvelegeme efter tørring i 50^oC
m_t	(kg)	Masse af prøvelegeme efter sugning til tiden t
m_{kap}	(kg)	Masse af prøvelegeme ved tiden t_{kap}
m_{slut}	(kg)	Masse af prøvelegeme ved afslutning af sugning
m_{105}	(kg)	Masse af prøvelegeme efter tørring ved 105^oC
h	(m)	Prøvelegemets højde
A	(m^2)	Prøvelegemets sugeflade
t	(s,m,t)	Tiden fra vandopsugningens start
t_{kap}	(s,m,t)	Tiden til knækpunktsabsorptionen, jf. Beton-Bogen, s. 631
t_{slut}	(s,m,t)	Tiden til sugeforsøgets afslutning
Q	(kg/m^2)	Masse af opsuget vand pr. m^2 sugefladeareal
Q_{kap}	(kg/m^2)	Masse af opsuget vand pr. m^2 sugefladeareal til tiden t_{kap}
u_{kap}	(kg/kg)	Vandtørstofforhold til tiden t_{kap}
u_{slut}	(kg/kg)	Vandtørstofforhold til tiden t_{slut}
u_{ssd}	(kg/kg)	Vandtørstofforhold i vacuumvandmættet overfladetør tilstand. Bestemmes i LBM-prøvemetode 2
$S_{vac,kap}$	(kg/kg)	Vacuumvandmætningsgraden til tiden t_{kap}
$S_{vac,slut}$	(kg/kg)	Vacuumvandmætningsgraden til tiden t_{slut}

	KAPILLARSUGNING LBM-Prøvemetode 1	6108/14, side 2 170189/ CBN:sl

Prøveudtagning

Antallet af prøver bestemmes ud fra en statistisk analyse.

Prøvelegemets størrelse bestemmes ud fra, hvor meget materiale der er til rådighed, og ud fra, om det pågældende materiale er svært at vandmætte.

Vandkontaktfladen på prøvelegemet skal være plan. Hvis der måles på beton, skal prøvens tværmål være 3-4 gange største stenstørrelse. Prøvehøjden skal være mindst 30 mm. Kontaktfladen skal være fri for urenheder (støv, olie etc.), som kan nedsætte vandopsugningsevnen (med mindre det er denne virkning, man ønsker at måle).

Hvis prøvelegemer af cementbaserede materialer skal opbevares i længere tid før prøvningen, må de beskyttes mod kemiske forandringer såsom karbonatisering.

Apparatur

- Varmeskab til forkonditionering på 50 ± 5°C.
- Ekssikkator med silicagel til opbevaring af prøvelegemerne under afkølingen.
- Vægt, hvor prøvelegemernes masse kan bestemmes med en nøjagtighed på 0,1%. - vægtkontrollod
- Fotobakker med afstandsholdere og "kuglelåg".
- Destilleret vand.
- Termometer (0,1°C deling)
- Ur til måling af opsugningstiden.
- Klude.

Fremgangsmåde

Prøvelegemet vejes i modtagelsessituationen, m_o (Skema 1).

Prøvelegemets sugeflade (A) og højde (h) måles (Skema 1).

Startsituationen for vandopsugningen skal principielt set være ligevægt i det klima, hvori den konstruktion, hvor materialet skal anvendes, befinder sig. Til sammenligningsformål kan man imidlertid anvende en standardiseret udgangssituation frembragt ved tørring af prøverne i 50 ± 5° C i ventileret ovn i mindst to døgn (for betonprøver på 25-30 mm tykkelse) eller til vægtkonstans (jf. diskussionen i Beton-Bogen, s. 629 ff). Derefter afkøles i ekssikkator med silicagel til stuetemperatur. Prøven vejes, m_{50} (Skema 1 og skema 2).

LBM	KAPILLARSUGNING LBM-prøvemetode 1	6108/14, side 3 170189/ CBN:sl

Sugefladen anbringes på afstandsholderne i kontakt med vand således, at vandet går 1-3 mm op på siden af prøvelegemet. Temperaturen i vandbadet skal være 20 ± 2°C. Afdæk vandbadet for at forhindre fordampning. Når der er kontakt mellem sugeflade og vand, startes uret.

Med passende tidsintervaller regnet fra kontakttidspunktet (f.eks. for t = 1, 2, 4, 8, 16 og 32 min. og 1, 2, 4, 8, 16, 24, 48 og 96 timer) tages prøvelegemer op, aftørres med en hårdt opvredet klud og vejes (vægt m_t) (Skema 2).

Vandopsugning stoppes efter mindst 4 dage, eller når massedifferencen mellem to vejninger er under 0,2 g.

Prøvelegemer tørres ved 105 ± 5°C i en ventileret ovn til vægtkonstans. Derefter afkøling i ekssikkator til stuetemperatur. Prøvelegeme vejes (vægt m_{105}) (Skema 1).

Beregninger

Opsugningsmålingerne omregnes til opsuget masse pr. arealenhed efter formlen

$$Q = \frac{m_t - m_{50}}{A} \quad (kg/m^2)$$

Q^2 beregnes og afsættes i et diagram $Q^2 = f(t)$. Fra dette diagram kan knækpunktsabsorption Q_{kap} og t_{kap} bestemmes.

Hældningskoefficienten i kurvens start angiver kvadratet på kapillaritetstallet, k. De to retlinede dele af opsugningskurven forlænges til skæring, hvorved tiden til knækpunktsabsorption, t_{kap}, og den tilhørende værdi Q_{kap}, kan bestemmes, jf. figur 1.

Når $Q^2 = f(t)$ anvendes i stedet for $Q = f\sqrt{t}$, skyldes det, at fejl i tidtagningen fra starten vil afsløres. Hvis materialet suger efter kvadratrodsreglen, vil en fejl vise sig som en afskæring på t-aksen

$$Q^2 = k^2(t_{målt} - t_{fejl})$$

Modstandstallet, M, beregnes af

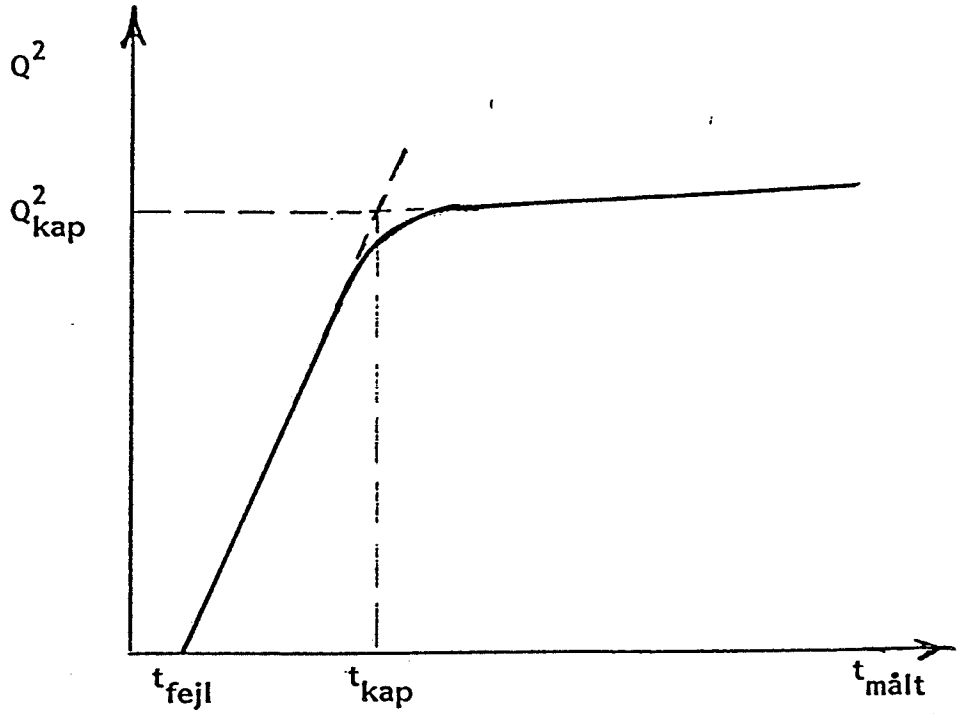
$$M = (t_{kap} - t_{fejl})/h^2 \quad [s/m^2]$$

Kapillaritetstallet, k, beregnes af

$$k = Q_{kap} / \sqrt{t_{kap} - t_{fejl}}$$

LBM	KAPILLARSUGNING LBM-Prøvemetode 1	6108/14, side 4 170189/ CBN:sl

De øvrige parametre bestemmes som vist med formlerne i Skema 1.



Figur 1.

	KAPILLARSUGNING, SKEMA 1	Hold:
LBM	Sag:	Dato:
		Initialer:

Rum: T = ^oC	Vand: T = ^oC	Vanddensitet ρ_w = kg/m^3			
Prøvelegeme nr.					
Højde, h	m				
Areal, A	m^2				
m_o	kg				
m_{50}	kg				
m_{kap}	kg				
m_{slut}	kg				
m_{105}	kg				
u_{ssd} fra LBM-Prøvemetode 2					
$S_{vac,kap} = u_{kap}/u_{vac}$					
$S_{vac,slut} = u_{slut}/u_{vac}$					

t_{kap} (fra figur)	s				
t_{fejl} (fra figur)	s				
Q_{kap} (fra figur)	kg/m^2				
$M=(t_{kap}-t_{fejl})/h^2$	s/m^2				
$k=Q_{kap}/\sqrt{t_{kap}-t_{fejl}}$	$kg/m^2 \cdot s^{\frac{1}{2}}$				
Bemærkninger:					

	KAPILLARSUGNING OG PORØSITET. SKEMA 2	Hold:
BM	Sag:	Dato:
		Initialer:

Rumtemperatur: ^{o}C	Vandtemperatur: ^{o}C

Vægtkontrollod	Før: kg,g	Efter: kg,g

Prøvelegeme nr.								
Dato	Klok-ken	Tid	m_t	Q	Q^2	m_t	Q	Q^2
		(s,m,t)	kg,g	kg/m^2	$(kg/m^2)^2$	kg,g	kg/m^2	$(kg/m^2)^2$
		0	$m_{50}=$	0	0	$m_{50}=$	0	0

LBM	FUGTPARAMETRE, PORØSITET OG DENSITET LBM-Prøvemetode 2.	6108/14 s. 1 290390 CBN: sl

Anvendelsesområde

Metoden anvendes til for et uorganisk, porøst materiale såsom beton, tegl og gasbeton at bestemme porøsitet og densitet.
Metoden kan eventuelt kombineres med LBM-prøvemetode 1.

Referencer

Metoden er en bearbejdet udgave af metode TI-B-25 fra Teknologisk Institut, Byggeteknik, 1983. Denne baserer sig på en RILEM Standard udgivet i Materiaux et Constructions Vol. 10, nr. 58.

Definitioner, begreber og symboler

Vægtkonstans regnes at gælde, når prøvelemets masse ikke ændrer sig mere end 0,1% i løbet af 4 timer.

m_o	(kg)	Masse af prøvelegemet før forsøget
m_{105}	(kg)	Masse af prøvelegeme efter tørring ved 105°C
m_{ssd}	(kg)	Masse i luft af vakuumvandmættet prøvelegeme i overfladetør tilstand
m_{sw}	(kg)	Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand
V	(m^3)	Prøvelegemets volumen
$V_{på}$	(m^3)	Volumen af åbne porer
ρ_f	(kg/m^3)	Faststofdensitet
ρ_d	(kg/m^3)	Tørdensitet
ρ_{ssd}	(kg/m^3)	Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand
$p_å$	(m^3/m^3)	Prøvelegemets åbne porøsitet
u_{ssd}	(kg/kg)	Vandtørstofforhold i vakuumvandmættet overfladetør tilstand

Prøveudtagning

Antallet af prøver bestemmes ud fra en statistisk analyse.

Prøvelegemets størrelse bestemmes ud fra, hvor meget materiale der er til rådighed, og ud fra, om det pågældende materiale er svært at vandmætte.

Hvis prøvelegemer af cementbaserede materialer skal opbevares i længere tid før prøvningen, må de beskyttes mod kemiske forandringer såsom karbonatisering.

LBM	FUGTPARAMETRE, PORØSITET OG DENSITET LBM-Prøvemetode 2.	6108/14 s. 2 290390 CBN:sl

Apparatur

- Varmeskab til udtørring ved 105 ± 5°C
- Ekssikkator med silicagel til opbevaring af prøvelegemerne under afkølingen
- Vægt, hvor prøvelegemernes masse kan bestemmes med en nøjagtighed på 0,1 % - vægtkontrollod
- Udstyr til vejning af prøvelegeme under vand
- Destilleret vand
- Termometer (0,1°C deling)
- Vakuumpumpe til tryk på ca. 100 N/m^2
- Ekssikkator til vakuummætning af prøvelegemer
- Klude

Fremgangsmåde

I tilfælde af, at man skal måle kapillarsugning på de samme prøvelegemer, skal sugningen, jf. LBM-PM-1, være udført først.

Prøvelegemer tørres ved 105 ± 5°C i en ventileret ovn til vægtkonstans. Tørring ved 105°C kan for nogle materialer medføre ændringer i porestrukturen. Disse materialer bør tørres ved en lavere temperatur. Derefter afkøling i ekssikkator til stuetemperatur. Prøvelegemet vejes (vægt m_{105}) (Skema 1).

Det udtørrede prøvelegeme evakueres tørt i ekssikkator i mindst 3 timer ved tryk på (~ torr).

Demineraliseret vand med rumtemperatur ledes ind i ekssikkatoren. Prøvelegemer skal være helt dækket med vand. Ekssikkatoren med vand og prøver evakueres til vands damptryk (2338 N/m^2 ~ 17,5 torr ved 20°C) og henstår ved dette tryk i mindst 1 time uden pumpning. Herefter ledes luft ind og prøverne henstår i vandet natten over ved atmosfæretryk.

De vandmættede prøvelegemer vejes i vand (vægt m_{sw}) (Skema 1). Efter aftørring af overfladen med en hårdt opvreden klud vejes prøvelegemer i luft (vægt m_{ssd}) (Skema 1).

Efter tørringen udtørres prøverne ved 105 ± 5°C til vægtkonstans og der foretages en kontrolvejning så det kan konstateres, om der er sket en udvaskning af prøverne ved vandmætningen.

Parametrene bestemmes som vist med formlerne i skema 1.

BM	POROSITET OG DENSITET, SKEMA 1	Hold:
	Sag:	Dato:
		Initialer:

Rum: T = °C	Vand: T = °C	Vanddensitet ρ_w = kg/m^3

Vægtkontrollod	Før: Kg,g	Efter: Kg,g

Prøvelegeme nr.					
m_{105}	kg				
m_{ssd}	kg				
m_{sw}	kg				
$V = (m_{ssd}-m_{sw})/\rho_w$	m^3				
$V_{på} = (m_{ssd}-m_{105})/\rho_w$	m^3				
$p_{å} = V_{på}/V$	m^3/m^3				
$\rho_d = m_{105}/V$	kg/m^3				
$\rho_f = m_{105}/(V-V_{på})$	kg/m^3				
$\rho_{ssd} = m_{ssd}/V$	kg/m^3				
$u_{ssd} = (m_{ssd}-m_{105})/m_{105}$	kg/kg				

Bemærkninger: