

Finn Thøgersen

**FUGTTRANSPORTKOEFFICIENTER
FOR
CEMENTBUNDNE MATERIALER**

Indsamling og bearbejdning af resultater
fra forsøg udført på LBM.



**THE TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
BUILDING MATERIALS LABORATORY**

INDHOLD

RESUMÉ

1.	INDLEDNING.	1
	1.1 Baggrund.	1
	1.2 Teori.	2
2.	KOPFORSØG.	4
	2.1 Teori.	4
	2.2 Sædvanlige kopforsøg for mørtel og beton.	5
	2.3 Specielt kopforsøg med cementpasta.	14
3.	VANDTRYKSFORSØG.	17
4.	UDTØRRINGSFORSØG.	19
5.	KAPILLARSUGNING.	22
6.	KONKLUSION.	24
	REFERENCER.	25

RESUMÉ.

I denne rapport findes en opsamling og bearbejdning af de senere års forsøgsresultater for permeabiliteten af cementpasta, mørtel og beton over for vand og vanddamp, der er blevet fundet ved Laboratoriet for Bygningsmaterialer. Resultaterne er stillet op således, at de i videst muligt omfang er sammenlignelige, d.v.s. der bliver brugt konsistente enheder, hvilket ikke er tilfældet i de oprindelige rapporter. Permeabiliteternes afhængighed af cementtype, vand-cementforhold, tilsætningsstoffer, lagringsforhold og prøvemethoder påvises og kommenteres. Resultaterne er især fundet ved kopforsøg, dog gengives også visse andre forsøgstyper, bl.a. udtørnings- og kapillarsugningsforsøg.

1. INDLEDNING.

1.1 Baggrund.

Permeabiliteten over for vand og vanddamp er af afgørende betydning for holdbarheden af betonkonstruktioner. De fleste nedbrydningsmekanismers omfang og farlighed er direkte afhængig af betonens aktuelle indhold af vand og vanddamp. Det gælder f.eks. armeringskorrosion, alkalikiselreaktioner og frostskaader. Ved vurdering af en given konstruktions levetid er det derfor nødvendigt at kunne estimere den aktuelle betons transportkoefficienter.

Adskillige betonteknologiske og forsøgstekniske faktorer har indflydelse på transportparametrene, og den bestemmelse af disse, som tilstræbes ved forsøg. Her kan i flæng nævnes:

- Materialesammensætning: Cementpasta, mørtel eller beton.
- Vand-cementforhold.
- Tilsætningsstoffer, plastificeringsmidler, luftindblanding.
- Flyveaske, silica.
- Lagringsbetingelser, fugthistorie.
- Forsøgstype, fugtforhold, temperatur.
- Prøvestørrelse, transportmekanisme.

De fleste af disse faktorer er igennem årene blevet undersøgt ved forsøg udført på Laboratoriet for Bygningsmaterialer. I de rapporter som ligger til grund for denne resultatindsamling, er transportkoefficienterne imidlertid angivet på forskellige måder, idet man har brugt forskellige mål for de drivende potentialer, samtidig med at gamle enheder har bidraget til at forvirre billedet. I denne rapport er transportkoefficienterne stillet op, som det f.eks. beskrives i BetonBogen /1/. I visse tilfælde er resultaterne taget direkte fra kilderapporterne, men for de flestes vedkommende er der foretaget en bearbejdning af resultaterne til brug i denne fremstilling.

1.2 Teori.

I et delvist vandmættet materiale kan transporten beskrives ved Fick's lov (1), der beregner fluxen q ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$). Det drivende potentiale er damptryksforskellen Δp over materialet med tykkelsen L .

$$q = \delta \frac{\Delta p}{L} \quad (1)$$

δ er vanddamptransportkoefficienten ($\text{kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$).

I et vandmættet materiale beskrives transporten af væske ved Darcy's lov (2), hvor det drivende potentiale er forskellen i hydraulisk tryk Δp_h over materialet.

$$q = K \frac{\Delta p_h}{L} \quad (2)$$

K er væsketransportkoefficienten ($\text{kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$).

Ved opslugningsforsøg beskrives kapillarsugningen ved kvadratrodsloven (3), der regnes at gælde for små opslugningshøjder.

$$q_{kap} = k \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

t er tiden og k er kapillaritetstallet ($\text{kg/m}^2 \sqrt{\text{s}}$).

De forsøg, der omtales i denne rapport, er udført på forskellige cementbundne materialer. Transportkoefficienterne forsynes med index, som angiver hvilket materiale de gælder for. Her står p for cementpasta, m for cementmørtel og b for beton. D.v.s. δ_m er f.eks. damptransportkoefficienten for cementmørtel.

En indbyrdes sammenligning mellem transportkoefficienter fundet for forskellige materialer, f.eks. cementpasta contra mørtel eller mørtel contra beton, kan med en vis rimelighed foretages, idet det antages, at hele transporten foregår i den porøse matrixfase, f.eks. gælder for væsketransport i mørtel:

$$K_m = \beta_p \cdot K_p \quad (4)$$

hvor β_p er cementpastaens volumenandel i mørtlen (ca. 0.5).

Tilsvarende gælder :

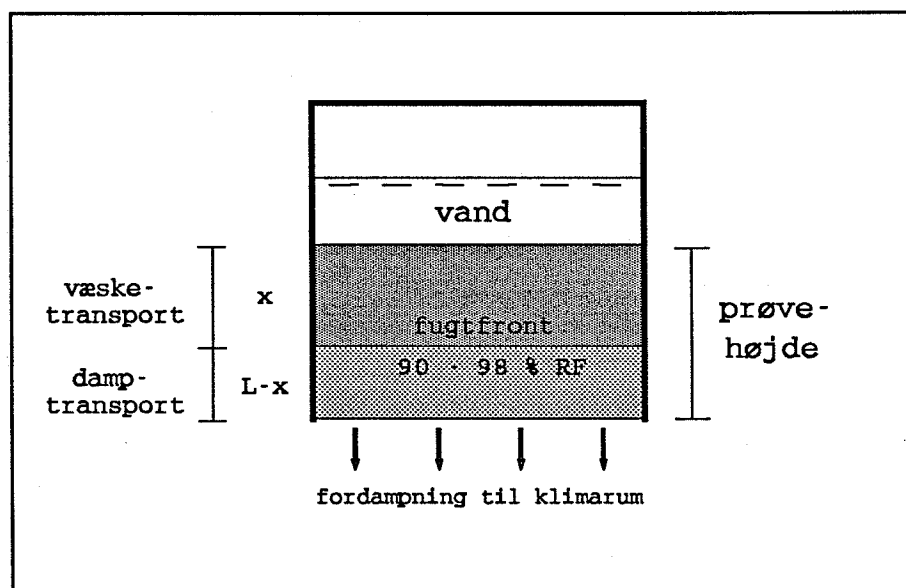
$$K_b = \beta_m \cdot K_m \quad (5)$$

Ud fra denne betragtning kan det altså forventes, at transportkoefficienterne for cementpasta er omkring dobbelt så store som for cementmørtel, der igen er dobbelt så store som for beton. Det skal dog nævnes, at de lokale forhold omkring tilslagskorn (sand eller sten) kan forstyrre dette billede. P.g.a. bleeding vil der ofte opstå en særligt porøs zone omkring tilslagkornene, hvor transporten er større end i den rene matrixfase. Reelt kan der altså ikke forventes så store forskelle på transportkoefficienterne for cementpasta, mørtel og beton som før beskrevet.

2. KOPFORSØG.

2.1 Teori.

I det følgende opsummeres forsøgsbetingelser og resultater fra en række kopforsøg. Resultaterne er for alle de første forsøgs vedkommende bearbejdet efter en metode udarbejdet af Thorsten Thorsen /2/, der muliggør bestemmelse af såvel damp- som væsketransportkoefficient ud fra ét kopforsøg. Det prøvelegeme, der ønskes undersøgt placeres som låg (eller bund ved omvendt kop) i en lukket kop med vand, således at der er 100 % RF på den ene side af prøven (direkte vandkontakt ved omvendt kop). Opstillingen fremgår af fig. 1.



Figur 1: Skitse af omvendt kop forsøg.

Koppen anbringes i klimakammer med kendt RF, og efter et stykke tid indtræder der en stationær tilstand, hvor den vandmængde der transporteres ud af koppen er konstant, d.v.s. koppens væggtab ændrer sig ikke med tiden. Ved vejning af prøvelegemet i denne sluttilstand, og i vandmættet og udtørret tilstand, samt ud fra kendskab til materialets sorptionsisoterm, er det muligt at bestemme fugtfrontens beliggenhed, d.v.s. afstanden x fra den indre overflade til et punkt i prøven med en given relativ fugtighed, hvor transportformen skifter fra væskestrømning til damptransport. Denne RF-værdi antages at befinde sig mellem 90 og 98 %.

Ved hjælp af (1) og (2) kan transportkoefficienterne nu bestemmes.

$$K = q \frac{x}{\Delta p_h} \quad (6)$$

hvor q er den transporterede vandmængde pr. tidsenhed i den stationære tilstand, og Δp_h er forskellen i hydraulisk tryk fra 100 til 90 (eller 98) % RF. Δp_h svarer tilnærmelsesvis til undertrykket svarende til den givne meniskenradius, idet det ydre vandtryk numerisk er langt mindre.

Tilsvarende findes for den del af prøven, hvor damptransporten dominerer:

$$\delta = q \frac{L-x}{\Delta p} \quad (7)$$

L er prøvens samlede højde og Δp er forskellen i damptryk fra 90 (eller 98) % RF til den RF-værdi, som man har i den omgivende luft i klimakammeret.

Denne metode giver altså et interval for K og δ , afhængig af RF-grænseværdien, der ikke kendes nøjagtigt.

2.2 Sædvanlige kopforsøg for mørtel og beton.

Annegrete Dalsgård Holland: Porestruktur i hærdnet cementpasta og mørtel med forskellige cementtyper og tilsætningsstoffer. /3/

Der bliver her udført omvendte kopforsøg med cementmørtler med $v/c = 0.40$. Der er undersøgt tre cementtyper: Portland Flyveaskecement (PFC), Rapidcement (ROC) og Lavalkali-sulfatbestandig cement (SAC), samt fire forskellige tilsætningsstoffer, nemlig et naftalenbaseret superplastificeringsstof, et melaminbaseret superplastificeringsstof, et lignosulfatbaseret plastificeringsstof og endelig et vandreducerende og retarderende stof tilhørende gruppen hydroxy-carboxylater. Efter udstøbning blev mørtlerne lagret i vand ved 20 °C i minimum 2 mdr. Forsøget udførtes i et rum med 55 % RF ved 20 °C, prøvehøjde 15 mm.

I det følgende vises resultaterne for de rene mørtler, samt det område, som resultaterne for de fire mørtler med tilsætningsstoffer befinder sig i:

PFC	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
$v/c = 0.40$	$10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
Uden tils.	0.14	0.57	2.4	1.9
Med tils.	0.12-0.15	0.47-0.62	2.3-6.2	1.8-5.0

ROC	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
$v/c = 0.40$	$10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
Uden tils.	0.11	0.42	2.6	2.1
Med tils.	0.09-0.13	0.38-0.52	3.1-3.4	2.5-2.8

SAC	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
$v/c = 0.40$	$10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
Uden tils.	0.14	0.56	3.2	2.6
Med tils.	0.13-0.22	0.54-0.87	3.0-4.4	2.4-3.6

Spredningen på de enkelte forsøgsresultater ligger på 5 - 20 % af de angivne middelværdier.

De undersøgte tilsætningsstoffer giver en beskedent forøgelse af transportkoefficienterne. For damptransport gælder dette især for det naftahalenbaserede superplastificeringsstof, der i alle tilfælde gav den højeste værdi i de i skemaerne angivne områder. Med hensyn til cementtypen er der ikke større forskelle, men dog en tendens til at Rapidcementen (ROC) giver den tætteste pasta, mens lavalkali-sulfatbestandig (SAC) er mest permeabel.

Alt i alt må det konkluderes, at damptransportkoefficienten δ_m for de undersøgte mørtler ligger på $2 - 5 \cdot 10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ og væsketransportkoefficienten K_m befinder sig i intervallet $0.1 - 0.8 \cdot 10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$.

Martin Waldstrøm og Kim Rosenbom: Permeabilitetsmålinger efter omvendt-kop og AASTHO T 277-831. /4/

Dette arbejde er en pilotprojekt udført som forberedelse til det følgende projekt. I pilotrapporten undersøges enkelte af de mørtelprøver ($v/c = 0.40$), som Annegrete D. Holland udstøbte og undersøgte. De resultater, der er direkte sammenlignelige med ADH's fremgår af denne tabel:

	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
	$10^{-15} \text{kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$		$10^{-12} \text{kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$	
PFC	0.12	0.38	2.1	2.0
ROC	0.15	0.53	2.2	2.0
SAC	0.18	0.64	2.9	2.7

Det er i alle tilfælde de "rene" mørtler, d.v.s. uden tilsætningsstoffer, der er undersøgt. Det er ikke muligt at konstatere væsentlige afvigelser i forhold til ADH's målinger, der er foretaget ca. 7 mdr. tidligere. Der blev desuden lavet omvendt kop-forsøg med mørtelskiver udskåret fra bunden af de oprindelige prøvecylindre, og her konstateredes en formindsket permeabilitet i forhold til skiver fra midten af cylindrene. Dette forsøges forklaret ved en højere sand-andel i bunden. Endvidere blev enkelte prøver udsat for udtørring/genmætning. Resultatet af denne simulering af udeklima var forøget permeabilitet.

Det skal understreges, at denne undersøgelses karakter af pilotprojekt gør resultaterne forholdsvis usikre. Forsøgene blev ikke udført i klimakammer, og det statistiske grundlag er dårligt, idet der kun blev målt på en prøve af hver type.

Til undersøgelse af prøvehøjdens betydning blev der udført enkle målinger med ROC-mørtler. Transportkoefficienterne blev 2-3 gange større for prøvehøjden 50 mm i forhold til højden 15 mm, og samtidig konstateredes en væsentlig større spredning på forsøgsresultaterne for prøvehøjden 50 mm.

Martin Waldstrøm og Kim Rosenbom: Permeabilitetsmålinger ved omvendt-kop og AASTHO T 277-831 samt porestrukturundersøgelse ved lavtemperaturmikrokalorimetri. /5/

Med det netop omtalte pilotprojekt som erfaringsgrundlag er der blevet gennemført en større serie omvendte kopforsøg med tre cementtyper, vand-cementforhold 0.40 og 0.60, og forskellige fugtforhold, nemlig dels jomfruelige prøver (V), d.v.s. vacuumvandmættede efter udstøbning og hærkning, dels udtørrede/genmættede (U), der er ovntørret ved 50 °C i 5-7 døgn og derefter genmættet med bl.a. trykvandmætning. Mørtlernes

alder ved forsøgsstart var 2 mdr., og forsøgene blev udført i klimakammer ved 63 % RF, 20 °C, prøvehøjden var 15 mm.

PFC	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
v/c	$10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
0.4 V	0.21	0.74	4.3	3.7
0.4 U	0.23	0.81	6.8	5.8
0.6 V	1.67	6.37	14.4	12.5

ROC	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
v/c	$10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
0.4 V	0.21	0.71	2.5	2.5
0.4 U	1.10	4.12	8.8	8.1
0.6 V	1.26	4.99	10.8	8.5

SAC	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
v/c	$10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
0.4 V	0.45	1.72	3.6	3.1
0.4 U	1.40	5.47	6.5	5.6
0.6 V	1.92	7.63	9.6	7.7

De angivne transportkoefficienter er fundet som gennemsnit af 6 værdier. Spredningen på forsøgsresultaterne er begrænset. Kun i enkelte tilfælde overstiger den 10 % af middelværdien.

For de jomfruelige prøver udviser permeabiliteten ikke nogen klar afhængighed af cementtypen. Derimod kan der for de udtørrede/genmættede prøver konstateres en større væskepermeabilitet for ROC- og SAC-mørtler, end for mørtler støbt med PFC.

Ved sammenligning mellem de jomfruelige og udtørrede/genmættede prøver med v/c = 0.40 ses det, at for PFC-mørtlerne er der ikke nogen væsentlig afhængighed af fugthistorien, mens der for de øvrige mørtler opnås transportkoefficienter, der er 2-6 gange større ved udtørring/genmætning.

Endelig kan der ved sammenligning mellem de to vand-cementtal konstateres 4-8 gange større væsketransport og 2-4 gange større damptransport for v/c = 0.6 i forhold til v/c = 0.4.

Som en sammenfatning på disse forsøg angives her de områder, som transportkoefficienterne for de jomfruelige mørtler befinder sig i:

	K_m $10^{-15} \text{ kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$	δ_m $10^{-12} \text{ kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
$v/c = 0.4$	0.2 - 1.7	2.5 - 4.0
$v/c = 0.6$	1.0 - 8.0	8.0 - 14.0

Ved mere varierende fugthistorier (f.eks. udeklimapåvirkning) kan disse transportkoefficienter som nævnt blive flere gange større.

Jørgen Schou: Tæthed af specialmørtel. /6/ (bearbejdet efter originale vejeresultater).

I dette arbejde udførtes omvendte kopforsøg på bl.a. to mørtler med v/c= 0.33 og 0.43, begge med et indhold af superplastificeringsmiddel, der udgør ca. 10 vægt-% af cementindholdet. Forsøgene udførtes i vindtunnel med RF = 44 % ved 23 °C, prøvehøjde 15 mm.

	K_m (90%)	K_m (98%)	δ_m (90%)	δ_m (98%)
v/c	10^{-15} kg/Pa·m·s		10^{-12} kg/Pa·m·s	
0.33	0.13	0.68	0.12	0.13
0.43	0.22	1.15	0.18	0.18

Det fremgår af resultaterne, at damptransportkoefficienten for disse mørtler er under en 1/10-del af de værdier, der er fundet på mørtler i de tidligere refererede undersøgelser. Det høje indhold af superplastificeringsmidler synes således at øge betonens tæthed væsentligt.

Jørgen Schou: Tæthed af vejmaterialer. /7/ (bearbejdet efter originale vejeresultater).

Der er her bl.a. lavet et retvendt kopforsøg med en betonprøve udtaget fra en motorvejsbro, alder ca. 10 år. Vand-cementforholdet var 0.46, luftindholdet målt på planslib 8 %. Forsøget udførtes i vindtunnel ved 44 % RF, 23 °C, prøvehøjde 21 mm.

	K_b (90%)	K_b (98%)	δ_b (90%)	δ_b (98%)
v/c	10^{-15} kg/Pa·m·s		10^{-12} kg/Pa·m·s	
0.46	0.62	3.23	1.3	1.3

Der er altså her tale om værdier for en udboret kerne, d.v.s. en "rigtig" beton, i modsætning til de forsøg som hidtil er refereret, der alle er lavet på udstøbte mørtelskiver.

Anne Marie Allerup: Undersøgelse af betons tilstand under forskellige hærdeforhold. /8/

I denne undersøgelse er der foretaget omvendte kopforsøg på to betoner med $v/c = 0.40$ og 0.55 . Betonerne blev støbt med PFC-cement, der blev anvendt plastificeringsstof, og luftindblandingsmiddel svarende til et luftindhold på 4-6 %. Der blev undersøgt betoner med og uden hærtningsmembran. På forsøgstidspunktet var betonen lagret 1 år ved $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 83 % RF. Forsøgene blev udført ved $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 53 % RF, prøvehøjden var 20 mm.

Idet formålet med forsøget var at undersøge hærdeembranens virkning, blev der udtaget prøver i toppen, midten og bunden af en udboret betoncylinder.

Her angives det område, som resultaterne ligger indenfor:

	K_b (90%)	K_b (98%)	δ_b (90%)	δ_b (98%)
$v/c = 0.40$	$10^{-15}\text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12}\text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
Uden memb.	0.08-0.19	0.42-0.99	1.9-2.8	1.5-2.3
Med memb.	0.08-0.17	0.42-0.89	1.6-2.7	1.3-2.2

	K_b (90%)	K_b (98%)	δ_b (90%)	δ_b (98%)
$v/c = 0.55$	$10^{-15}\text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$		$10^{-12}\text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	
Uden memb.	0.16-0.22	0.86-1.19	4.4-7.1	3.6-5.9
Med memb.	0.16-0.68	0.86-3.60	5.0-12.8	4.1-10.6

Spredningen på de enkelte forsøgsresultater ligger på 10 - 40 % af de angivne middelværdier.

Forsøget viser, at hærtningsmembranen forøger porøsiteten, og dermed transportkoefficienterne (permeabiliteten) lige under overfladen, specielt for $v/c = 0.55$. For hele betonvolumenet er der ikke nogen markant ændring. Hvis man ser bort fra de høje transportkoefficienter lige under hærdeembranen, kan resultaterne for de undersøgte betoner opsummeres således:

	K_b $10^{-15}\text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	δ_b $10^{-12}\text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
$v/c = 0.40$	0.1 - 1.0	1 - 3
$v/c = 0.55$	0.2 - 2.0	4 - 7

Preben Kirkegård Madsen: Fugttransport i beton. /9/ (bearbejdet efter originale vejeresultater).

Der er her lavet en meget omfattende forsøgsserie med både retvendte og omvendte kopforsøg på tre betoner, vand-cementforhold 0.40, 0.50 og 0.60 støbt med hvid cement, uden luftindblanding. Efter støbning opbevares prøverne 1 md. forseglet, derefter i klimarum. Ved forsøgsstart var betonens alder knap 2 mdr., fugtniveau svarende til selvudtørret tilstand. Der blev gennemført to forsøgsserier på forskudte tidspunkter, én ved 19.5 °C, 55 % RF, én ved 19.5 °C, 57.5 % RF. Endvidere blev kopforsøgene udført med to prøvehøjder, 3 cm og 6 cm.

I det følgende er hvert tal et gennemsnit for to prøver i hver forsøgsserie, d.v.s. af fire tal. Først vises en bearbejdning af resultaterne fra de omvendte kopforsøg:

OMV. KOP	K_b (90%)	K_b (98%)	δ_b (90%)	δ_b (98%)
v/c = 0.40	10^{-15} kg/Pa·m·s		10^{-12} kg/Pa·m·s	
h = 30 mm	0.13	0.47	2.6	2.8
h = 60 mm	0.10	0.33	3.0	3.1

OMV. KOP	K_b (90%)	K_b (98%)	δ_b (90%)	δ_b (98%)
v/c = 0.50	10^{-15} kg/Pa·m·s		10^{-12} kg/Pa·m·s	
h = 30 mm	0.23	1.03	3.5	3.4
h = 60 mm	0.33	1.44	6.0	5.9

OMV. KOP	K_b (90%)	K_b (98%)	δ_b (90%)	δ_b (98%)
v/c = 0.60	10^{-15} kg/Pa·m·s		10^{-12} kg/Pa·m·s	
h = 30 mm	0.50	2.42	5.6	5.3
h = 60 mm	0.46	2.16	6.4	6.1

Der blev sideløbende udført retvendte kopforsøg med de samme betoner:

RETV.KOP v/c = 0.40	K _b (90%)	K _b (98%)	δ _b (90%)	δ _b (98%)
	10 ⁻¹⁵ kg/Pa·m·s		10 ⁻¹² kg/Pa·m·s	
h = 30 mm	0.08	0.27	1.9	2.0
h = 60 mm	0.12	0.41	3.1	3.2

RETV.KOP v/c = 0.50	K _b (90%)	K _b (98%)	δ _b (90%)	δ _b (98%)
	10 ⁻¹⁵ kg/Pa·m·s		10 ⁻¹² kg/Pa·m·s	
h = 30 mm	0.08	0.25	3.3	3.3
h = 60 mm	0.14	0.54	4.1	4.0

RETV.KOP v/c = 0.60	K _b (90%)	K _b (98%)	δ _b (90%)	δ _b (98%)
	10 ⁻¹⁵ kg/Pa·m·s		10 ⁻¹² kg/Pa·m·s	
h = 30 mm	0.09	0.25	4.5	4.4
h = 60 mm	0.20	0.81	5.7	5.4

Det skal her nævnes, at nogle af tallene dækker over ret store spredninger, især mellem de to måleserier.

Ved sammenligning mellem de to typer kopforsøg ses det, at der generelt er større transport ved de omvendte kopforsøg i forhold til retvendt kop. Der er ikke nogen markant forskel på dampdiffusionskoefficienterne, hvorimod væsketransportkoefficienterne for v/c = 0.50 og v/c = 0.60 er 2-4 gange større ved omvendte kopforsøg. Dette kan forklares ved en direkte transport af vand, der p.g.a. vandtryk presses igennem de grove porer ved omvendte kopforsøg, hvor der er direkte vandkontakt med betonoverfladen. Disse grove porer vil netop optræde i stigende antal ved højere vand-cementtal. Ved retvendt kopforsøg vil der derimod være en vis overgangsmodstand mellem dampmættet luft og væskefase.

Det fremgår af tallene, at transportkoefficienterne udviser en ret klar afhængighed af prøvehøjden. I næsten alle tilfælde fås højere transportkoefficienter når prøvehøjden øges.

Sammenfattende for denne store forsøgsserie vises her de områder, som transportkoefficienterne befinder sig indenfor, med skyldig hensyntagen til prøvemethode, prøvedimension, spredninger m.v.:

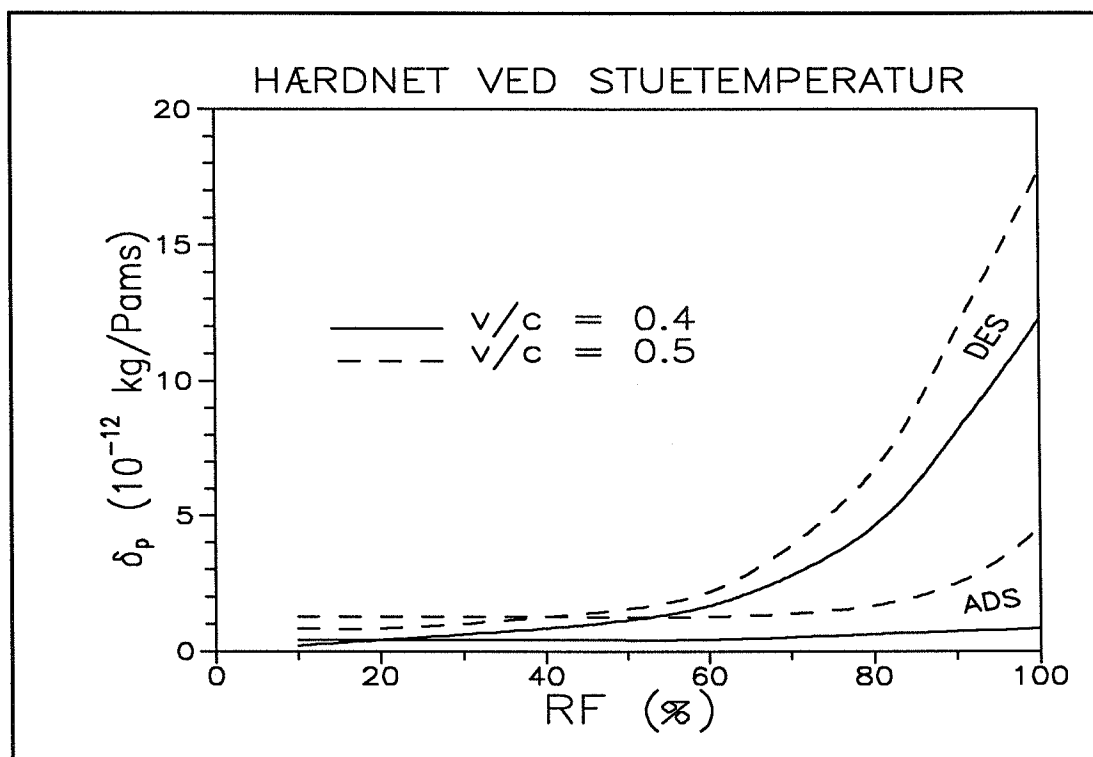
	K_b $10^{-15} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	δ_b $10^{-12} \text{ kg/Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
$v/c = 0.40$	0.1 - 0.5	1.5 - 3.5
$v/c = 0.50$	0.1 - 1.5	3.0 - 6.0
$v/c = 0.60$	0.1 - 2.5	4.5 - 6.5

Der er god overensstemmelse mellem disse tal og AMA's forsøgsresultater.

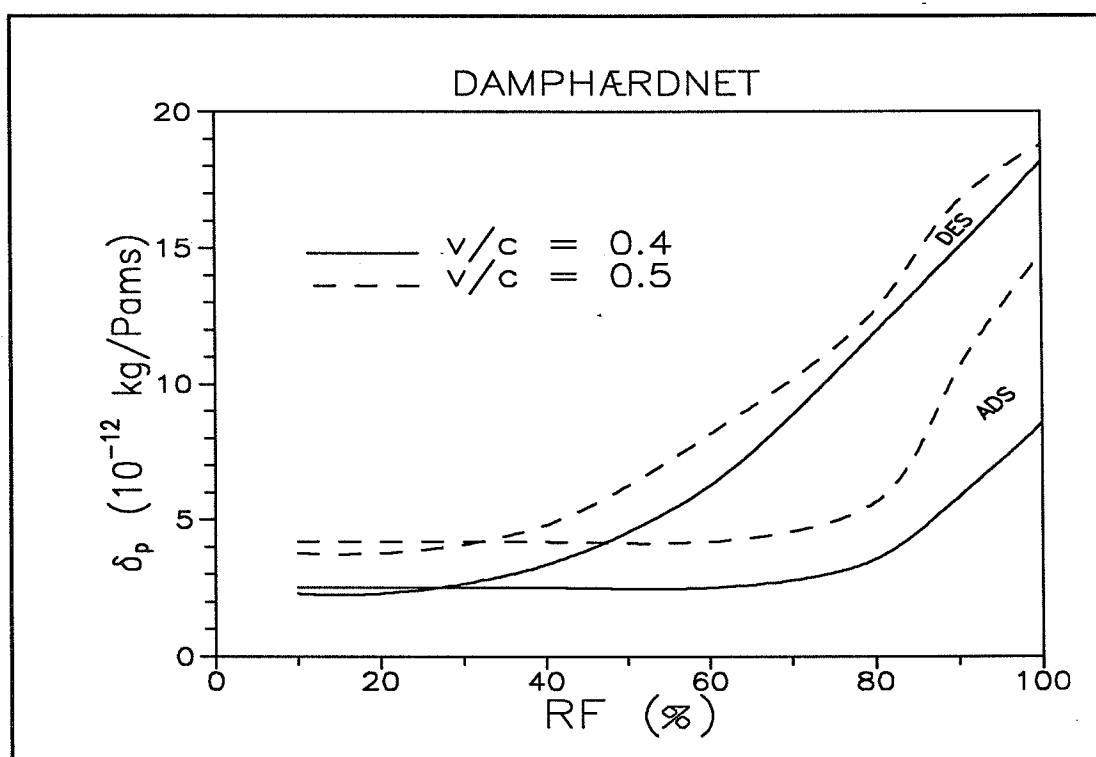
2.3 Specielt kopforsøg med cementpasta.

Eigil V. Sørensen: Water vapour permeability of hardened cement paste. /10/

Her udføres omvendte kopforsøg med en noget anderledes opstilling end i de hidtil refererede forsøg. I dette tilfælde forgår transporten fra omgivelserne og ind i koppen, som indeholder magnesium perchlorat hydrat, der opsuger alt den indkommende fugt. Der er således 0 % RF ved prøvens indvendige overflade, hvor der er direkte kontakt med saltet. Disse kopper placeres i en ekssikkator, hvor klimaet styres ved hjælp af en cirkulerende luftstrøm, hvis relative fugtighed reguleres med forskellige saltopløsninger. Forsøgene udførtes på cementpastaskiver med $v/c = 0.40$ og 0.50 , der blev slebet ned til en tykkelse af 1 mm. Der blev undersøgt prøver af cementpasta hærnet i kalkvand ved stuetemperatur i ca. 7 mdr. og prøver, damphærnet ved 97°C i 7 dage, og derefter opbevaret i kalkvand i ca. 2 mdr. Der blev brugt kalkvand for at forhindre karbonatisering. Endelig undersøgtes både udtørrede prøver, der i løbet af forsøget opfugtes (adsorption), og udtørrede/genmættede prøver, der udtørres under forsøget (desorption). Ved disse forsøg bestemmes damppermeabiliteten δ_p 's afhængighed af betonens RF-niveau for de otte forskellige prøvetyper. Resultaterne vises på grafisk form i figur 2 og 3.



Figur 2: Damptransportkoefficienter for cementpastaprøver hærnet ved stuetemperatur.



Figur 3: Damptransportkoefficienter for damphærtnede cementpastaprøver.

Transportkoefficienterne udviser en ganske klar afhængighed af fugtforholdene i startsituationen. De genmættede prøver transporterer betydeligt mere fugt end de udtørrede, når den relative fugtighed er højere end ca. 50 %. Endvidere er afhængigheden af fugtniveauet mere udpræget for de genmættede prøver. Med RF-værdier mindre end 80 % er permeabiliteten af de udtørrede prøver tilnærmelsesvis konstant. Der kan altså konstateres en markant "permeabilitets-hysteres".

Forsøgene viser som forventet, at permeabiliteten af pasta med $v/c = 0.50$ er større end for $v/c = 0.40$. Betonens hærdeforhold er ligeledes af afgørende betydning for permeabiliteten. De damphærdnede prøvers permeabilitet er 2-4 gange større end permeabiliteten af de stuetemperatur-hærdnede. Dette skyldes de ændringer af porestrukturen, der optræder under damphærdningen.

I rapporten findes i øvrigt et omfattende litteraturstudie over andre målinger af betons tæthed.

3. VANDTRYKSFORSØG.

Søren E. Hedegård: Flyveaskebeton. Proportionering og tæthed overfor indtrængning af kloridioner og vand. /11/

I denne rapport findes bl.a. resultater fra forsøg til bestemmelse af flyveaskebetons vandtæthed. Der blev udført forsøg på betoner støbt med alm. Portland cement (OPC) og lavalkali-sulfatbestandig cement (SAC) med varierende indhold af Asnæs flyveaske. Efter udstøbning er betonerne hærdnet i vand ved 20 °C i 28 døgn. Prøvningen udførtes efter den tyske prøvemethode DIN 1048, hvor betonprismer (200 x 200 x 120 mm) udsættes for trinvist stigende vandtryk i en periode af 4 døgn. Herefter flækkes prøvelegemerne, vandindtrængningsdybden måles og herudfra beregnes permeabilitetskoefficienten. Der er undersøgt forskellige vand-cementforhold og flyveaske-vandforhold (f/v).

OPC	K_b (10^{-12} kg/Pa·m·s)				
f/v	v/c = 1.00	v/c = 0.71	v/c = 0.56	v/c = 0.45	v/c = 0.38
2.0	1.0	0.02			
1.6	0.9	0.05	0.2		
1.2	5.8	0.7	0.1		
0.8	12.5	2.4	1.4	0.4	
0.4	21.9	5.9	1.6	0.6	
0.0	41.5	10.0	1.8	0.9	0.02

SAC	K_b (10^{-12} kg/Pa·m·s)				
f/v	v/c = 1.00	v/c = 0.71	v/c = 0.56	v/c = 0.45	v/c = 0.38
2.0	2.3	1.5			
1.6	2.7	2.8	0.6		
1.2	6.2	3.0	0.02		
0.8	14.2	1.6	1.4	1.5	
0.4	21.9	3.0	1.7	0.3	
0.0	21.6	5.5	1.9	4.5	0.01

Disse tal er omkring 1000 gange større end de værdier, der opnås ved de tidligere refererede kopforsøg. Ud over den forskel, der skyldes de helt forskellige forsøgsbetingelser, skal det understreges, at der ved det beskrevne trykforsøg ikke er tale om stationær transport. Samtidig er opmålingen af indtrængningsdybden behæftet med stor usikkerhed. I denne forbindelse må kopforsøgenes resultater imidlertid tillægges den største vægt. Det påpeges da også i rapporten, at den beskrevne målemetode især kan bruges til at sammenligne forskellige betoners permeabilitet, og i ringere grad giver kvantitative mål for den virkelige permeabilitet.

Resultaterne giver ikke noget tydeligt svar på hvilken cementtype, der giver den mest permeable beton. Der er dog nok en tendens til, at lavalkali-sulfatbestandig cement har større permeabilitet, især for høje flyveaskeindhold. I øvrigt er det tydeligt, at tilsætning af flyveaske forbedrer betonens vandtæthed betydeligt. For fastholdt v/c er det muligt at opnå 5-10 gange tættere beton ved at tilsætte flyveaske. I rapporten gennemføres i øvrigt et ret omfattende litteraturstudie i diffusions- og permeabilitetsforhold for flyveaskebeton.

4. UDTØRRINGSFORSØG.

Ved udtørring af to geometrisk identiske prøvelegemer, der udsættes for de samme fugtforhold, er det ved analyse af vægttabskurverne muligt at bestemme relative diffusionskoefficienter for de to materialer. Dette forsøg er meget enkelt at udføre, dog giver det desværre ikke absolutte værdier for transportkoefficienterne, men kun en værdi for en given prøves permeabilitet i forhold til en referenceprøve.

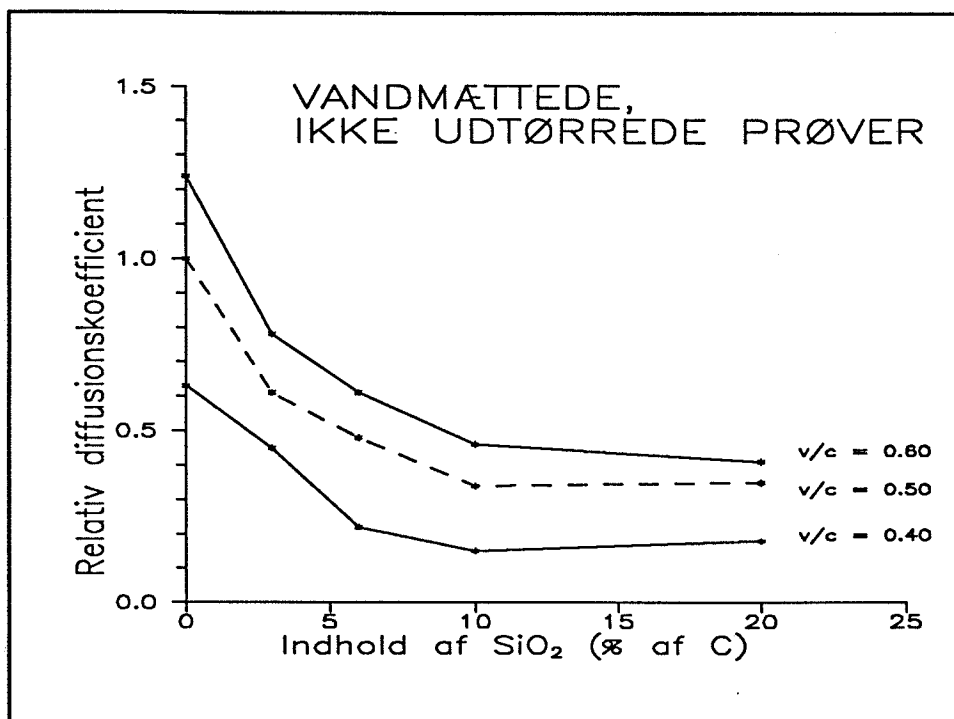
Dirch H. Bager: Effect of curing on the pore structure and permeability of cement-flyash mortars. /12/

Her undersøges mørtler med $v/c = 0.40$ og 0.60 med og uden flyveasketilsætning. I flyveaskemørtlerne anvendtes en flyveaskemængde på 33 vægtprocent af cementmængden (lavalkalicement). Prøverne med tykkelse 4 mm og diameter 22 mm hærtnede under vand i op til 14 døgn, hvorefter udtørringen startede.

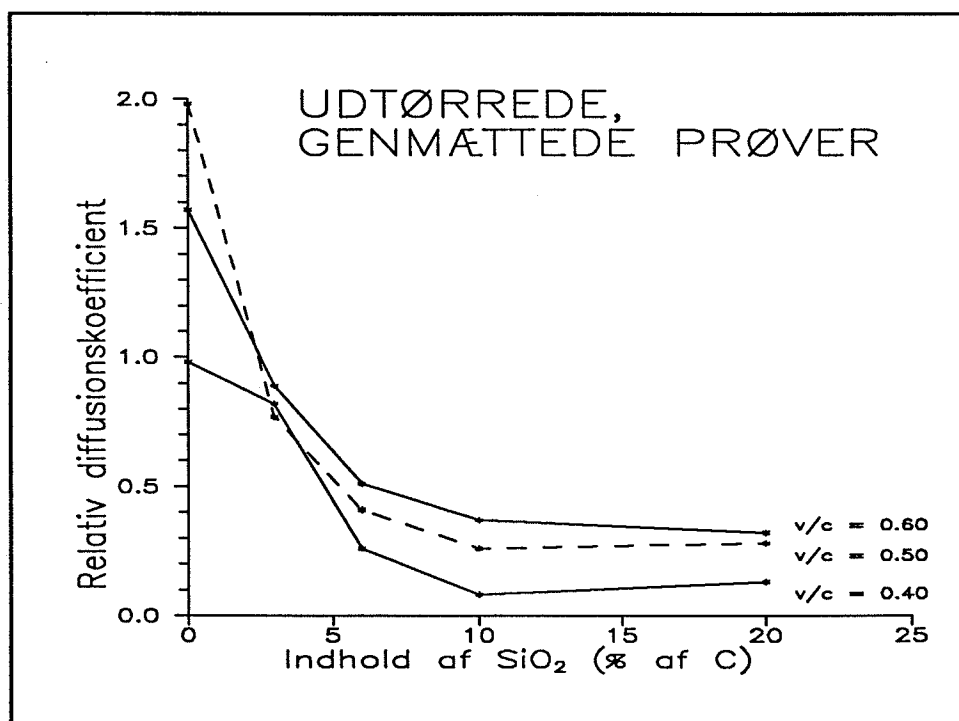
Ved disse forsøg konstateredes ikke overraskende forøget tæthed, jo længere mørtlerne havde hærtnet under vand. Efter 14 døgn lagring var diffusionskoefficienterne 2-3 gange mindre end efter 2 døgn. Endvidere var mørtlerne med $v/c = 0.40$ omtrent dobbelt så tætte som mørtler med $v/c = 0.60$. Derimod var det overraskende, at mørtlerne med flyveaske viste sig at være mest permeable. Efter 14 døgn vandlagring var diffusionskoefficienterne for flyveaskemørtlerne 10-20 % højere end de tilsvarende uden flyveaske. Dette underbygges af en sideløbende undersøgelse af isdannelse i mørtlerne, som viser, at porestrukturen i flyveaskemørtlerne er grovere. I en kommentar til Bagers undersøgelse nævner Søren Hedegård, at denne modstrid med den sædvanlige opfattelse, nemlig at flyveasketilsætning forøger betonens tæthed, skyldes, at de undersøgte mørtler var lagret i meget kort tid. Flyveaskens forbedrende virkning på betonens permeabilitet tænkes først at slå igennem efter en noget længere vandlagringsperiode.

Anders B. Christophersen: Egenskaber ved beton og mørtler med tilsætning af silica. /13/

I denne rapport undersøges mørtler med $v/c = 0.40$, 0.50 og 0.60 med tilsætning af silicastøv svarende til 0, 3, 6, 10 og 20 vægtprocent af cementmængden (hvid cement). Der blev tilsat superplastificeringsmiddel for at forbedre dispergeringen af silicastøvet. Målingerne blev foretaget på skiver med diameter 45 mm og tykkelse 5 mm. Der blev undersøgt vandmættede, aldrig udtørrede prøver og udtørrede, genmættede prøver. I fig. 4 og 5 vises resultaterne, fundet som middelværdier for 25, 50 og 75 % udtørring. Diffusionskoefficienterne er normerede ud fra en vandmættet, aldrig udtørret mørtel med $v/c = 0.50$ uden tilsætning af silicastøv.



Figur 4: Relative difusionskoefficienter for vandmættede, aldrig udtørrede prøver.



Figur 5: Relative difusionskoefficienter for udtørrede, genmættede prøver.

Det fremgår af figurerne, at tilsætning af mindre mængder silica forøger mørtlernes tæthed betragteligt. Med 10 % silica er diffusionskoefficienterne 2-4 gange mindre end når der ikke tilsættes silica. Derimod ser det ud til, at yderligere tilsætning ikke giver nogen effekt. Endvidere iagttages den sædvanlige tætnende effekt af en sænkning af vand-cementforholdet, samt en vis afhængighed af fugthistorien. Ved udtørringen ændres porestrukturen, således at silicaens virkning for permeabiliteten bliver ekstra udtalt. Uden silicatilsætning er diffusionskoefficienterne for de udtørrede, genmættede prøver højest, hvorimod disse med en vis mængde silica får lavere diffusionskoefficienter end de prøver, der ikke har været udtørret.

Jens Villadsen: Hærdetemperaturens indflydelse på hærdnet cementpastas porestruktur. /14/

Der er her lavet udtørringsforsøg på cementpastaprøver fremstillet af hvid cement med $v/c = 0.40$, med og uden tilsætning af 8 % mikrosilica (% af cementvægten). Der er undersøgt tre forskellige lagringstemperaturer, nemlig 20 °C, 45 °C og 70 °C. Ligeledes undersøges tæthedens afhængighed af prøvens fugthistorie, d.v.s. enten jomfruelig (V) eller udtørret/genmættet (U). Resultaterne fundet som middelværdier for 25, 50 og 75 % udtørring vises her. Diffusionskoefficienterne er normerede m.h.t. en jomfruelig pasta uden mikrosilica hærdnet ved 20 °C.

Prøve	Hærdetemperatur		
	20 °C	45 °C	70 °C
V	1.00	1.29	2.70
U	1.01	1.33	3.24
V 8 % MS	0.57	0.35	1.49
U 8 % MS	-	-	1.74

Resultaterne viser, at hærdetemperaturen har en markant indflydelse på pastaens tæthed, idet transportkoefficienterne er ca. 3 gange højere ved 70 °C end ved 20 °C. Efter udtørring/genmætning forøges transportkoefficienterne lidt ved høje hærdetemperaturer. Endelig fremgår det, at tilsætning af 8 % mikrosilica øger pastaens tæthed væsentligt.

Annegrete D. Holland /3/ har lavet udtørringsforsøg med de mørtler, der også blev brugt til kopforsøg, d.v.s. $v/c = 0.40$ med fire forskellige tilsætningsstoffer. Her konstateres ligeledes størst tæthed af mørtler med ROC-cement i forhold til PFC og SAC. Permeabiliteten af mørtler med tilsætningsstoffer er generelt lidt højere end for mørtler uden.

5. KAPILLARSUGNING.

Anne Marie Allerup /8/ har lavet sædvanlige kapillarsugningsforsøg på de samme betoner, som blev brugt til kopforsøgene, d.v.s. $v/c = 0.40$ og 0.55 . Prøver med diameter 60 mm, højde 20 mm blev anbragt med vandkontakt, og vejede med jævne mellemrum i op til tre døgn. Der blev dels undersøgt prøver der var udtørret ved $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, og dels jomfruelige (selvudtørrede) prøver, der havde det oprindelige fugtindhold. Der er fundet kapillaritetstal for prøver fra cylindre med og uden hærde membran, udtaget fra top, midte og bund af cylindrene. Her vises det område, som resultaterne ligger i:

Udtørrede prøver		k_b ($10^{-3}\text{ kg/m}^2\sqrt{s}$)
$v/c = 0.40$	Uden membran	9.2 - 11.6
	Med membran	9.7 - 13.7
$v/c = 0.55$	Uden membran	14.2 - 15.7
	Med membran	14.1 - 17.8

Jomfruelige prøver		k_b ($10^{-3}\text{ kg/m}^2\sqrt{s}$)
$v/c = 0.40$	Uden membran	5.1 - 13.1
	Med membran	3.2 - 4.3
$v/c = 0.55$	Uden membran	5.4 - 26.4
	Med membran	4.9 - 16.3

Det bør her understreges, at det statistiske grundlag for resultaterne fra de udtørrede prøver er betydeligt bedre, idet der her var fire cylindre, i alt 12 prøver, mens der kun var en jomfruelig cylinder, d.v.s. tre prøver.

En direkte sammenligning af kapillaritetstallene for de to prøvetyper er ikke mulig, idet de er fundet for forskellige tidsintervaller. Tallene for de udtørrede prøver er fundet ud fra vejeresultater i intervallet 1-120 min, mens de jomfruelige er fundet fra 0-4 min. Opsugningen sker altså noget hurtigere i de fugtige prøver, hvor der ikke først skal ske en opfyldning af alle porer. Derimod fremgår det tydeligt ved nøjere betragtning af AMA's vejeresultater, at slutniveauet er langt højere for de udtørrede prøver. Der optages 2-3 gange så meget vand i disse, hvilket skyldes, at kapillarporøsiteten er blevet ændret under opvarmningen. Derudover kan det konstateres, at for de ikke-udtørrede prøver er porøsiteten større når der ikke bruges hærde membran. Endelig fremgår det, at porøsiteten som forventet stiger med vand-cementtallet.

Preben Kirkegård Madsen /9/ har ligeledes lavet kapillarsugningsforsøg med de tre undersøgte betoner, $v/c = 0.40, 0.50$ og 0.60 . I dette tilfælde blev cylindriske prøveemner med diameter 100 mm og højderne 30 og 60 mm forseglet med epoxy på den krumme flade, og derefter nedsænket i vand, således at op sugningen skete fra begge endefladerne. Her vises kapillaritetstallene for tidsintervallet 1 - 10 min, hvor op sugningen bedst følger kvadratrodsloven (bearbejdet efter originale vejeresultater).

v/c	prøvehøjde (mm)	k_b ($10^{-3} \text{ kg/m}^2 \sqrt{s}$)	k_b -middel ($10^{-3} \text{ kg/m}^2 \sqrt{s}$)
0.40	30	1.74	1.8
	60	1.89	
0.50	30	1.96	2.6
	60	3.32	
0.60	30	3.77	3.6
	60	3.34	

Der var to prøvelegemer af hver type, d.v.s. kapillaritetstallene i tredje søjle er fundet som et gennemsnit af to værdier.

Der kan ud fra disse prøveresultater ikke siges noget entydigt om effekten af forskellige prøvehøjder. Derimod kan der også her konstateres større porøsitet ved højere vand-cementforhold. Ved sammenligning med resultaterne for AMA's ikke-udtørrede prøver fremgår det, at PKM's kapillaritetstal er noget mindre. Dette kan enten skyldes de lidt forskellige forsøgsbetingelser eller forskelle i betonrecepterne.

6. AFSLUTNING.

Ved en samlet betragtning af de refererede forsøg fremgår det tydeligt, at cementbundne materials transportparametre absolut ikke er entydige størrelser. En vurdering af transportforholdene for en praktisk konstruktion kræver kendskab til både materialesammensætning og de klimaforhold, som konstruktionen vil blive udsat for. Herefter er det muligt, enten at finde eksisterende forsøgsresultater, der belyser det aktuelle tilfælde, eller eventuelt designe målrettede forsøg til bestemmelse af fugttransportparametrene. I denne rapport er der dels angivet en række absolutte værdier for transportkoefficienter, dels refereret forsøg, som klarlægger virkningen af ændringer i de betydende parametre. En sammenstilling eller optegning af alle resultater under ét vil ikke blive foretaget, idet blanderecepter og forsøgsbetingelser som nævnt varierer meget.

REFERENCER.

- /1/ Nielsen A. m.fl.: BetonBogen, Aalborg Portland, 1979.
- /2/ Thorsen, T.: Inverted Cup Method, Proceedings of Symposium on Building Physics, Sweden 1987.
- /3/ Holland, A.D.: Porestruktur i hærdnet cementpasta og mørtel med forskellige tilsætningsstoffer, TR 223/90, LBM, DTH.
- /4/ Waldstrøm, M. & Rosenbom, K.: Permeabilitetsmålinger efter omvendt kop og AASTHO T 277-831. Udstøbning af mørtler, pilotrapport, 18 points B-projekt, forår 1991, LBM, DTH.
- /5/ Waldstrøm, M. & Rosenbom, K.: Permeabilitetsmålinger ved omvendt kop og AASTHO T 277-831 samt porestrukturundersøgelse ved lavtemperaturmikrokalorimetri, hovedrapport, 18 points B-projekt, forår 1991, LBM, DTH.
- /6/ Schou, J.: Tæthed af specialmørtel, DIA-B, 1982.
- /7/ Schou, J.: Tæthed af vejmaterialer, DIA-B, 1982.
- /8/ Allerup, A.M.: Undersøgelse af betons tilstand under forskellige hærdningsforhold, eksamensprojekt efterår 1987, LBM, DTH.
- /9/ Madsen, P.K.: Fugttransport i beton, individuelt kursus forår 1985, LBM, DTH.
- /10/ Sørensen, E.V.: Water vapour permeability of hardened cement paste, TR 83/80, LBM, DTH.
- /11/ Hedegård, S.E.: Flyveaskebeton. Proportionering og tæthed overfor indtrængning af chlorider og vand, TR 221/90, LBM, DTH.
- /12/ Bager, D.B.: Effect of curing on the pore structure and permeability of cement-flyash mortars, TR 139/84, LBM, DTH.
- /13/ Christophersen, A.B.: Egenskaber ved beton og mørtler med tilsætning af silica, TR 125/83, LBM, DTH.
- /14/ Villadsen, J.: Hærdetemperaturens indflydelse på hærdnet cementpastas porestruktur, TR 218/90, LBM, DTH.

