Per Johan Jönis
Christer Molin

MÄTNING AV BETONGENS LUFTPERMEABILITET
Laboratoriestudie av en fältmässig metod

SP RAPPORT 1988:43
Byggnadsteknik
Stockholm

ABSTRACT

Measuring of air-permeability of concrete

Air-permeability is very important for the durability of concrete. It is apparent that there is limited general knowledge about the techniques for measuring permeability especially those which are appropriate for measuring the permeability of concrete structures.

The study shows that Figg's equipment is easy to handle. However, the operator must be very thorough and priming treatment of the drillhole must be made.

Measurements have been carried out on several different qualities and curings which indicate that the method is accurate and relevant. Though it doesn't give the permeability in any established unit. Of course the relative humidity has a great effect on the permeability.

Key words: permeability, concrete structure, method evaluation.

STATENS PROVNINGSANSTALT
Rapport 1988:43
ISBN 91-7848-128-7
ISSN 0284-5172
Stockholm 1988

SWEDISH NATIONAL TESTING INSTITUTE
Report 1988:43

Postal address:
P.O. Box 5608, S-114 86 STOCKHOLM
SWEDEN
Telephone Int + 46 8 - 103240
Telex 36253 Testing S

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		SID
	ABSTRACT	2
	FÖRORD	4
1	SAMMANFATTNING	5
2	INLEDNING	6
2.1	Bakgrund	6
2.2	Syfte	6
3	ALLMÄNT OM POROSITET OCH PERMEABILITET	7
3.1	Definitioner	7
3.2	Transportmekanismen i betong	7
3.3	Samband	7
3.4	Enheter	10
4	FIGGS METOD	11
4.1	Beskrivning av Figgs metod	11
4.2	Osäkerhet i mätningsförfarandet	14
4.3	Föreslagen försöksklassificering	15
5	UTFÖRANDE OCH OMFATTNING	16
5.1	Applicering och teknik	17
5.2	Kontroll av mätningsförfarandet	18
5.3	Valt mätningsförfarande	19
5.4	Variation av betongens relativa fuktighet	19
6	RESULTAT	20
6.1	Primningens inverkan	20
6.2	Relativa fuktighetens inverkan	21
6.3	Samband - diagram	21
7	KORRELATION TILL VEDERTAGEN LABORATORIEMETOD	22
8	KOMMENTARER OCH SLUTSATSER	25
8.1	Praktisk tillämpbarhet	25
8.2	Tillförlitlighet	25
8.3	Noggrannhet, repeterbarhet	25
8.4	Maximala stenstorlekens betydelse	26
8.5	Relativa fuktighetens betydelse	27
8.6	Förslag till minimikrav för luftpermeabiliteten	29
9	FÖRSLAG TILL VIDAREUTVECKLING	30
10	REFERENSER	31

FÖRORD

Arbetet med att utveckla Figgs utrustning för permeabilitetsmätning är en del av en större satsning på icke förstörande fältprovning för tillståndsbedömning av betongkonstruktioner. Utvecklingsarbete inom området bedrivs också av SP:s konstruktionslaboratorium i Borås, tekniska högskolorna i Stockholm och Lund.

Arbetet har finansierats av Statens provningsanstalt. Vi vill framföra ett stort tack till Jonas Rockström för hans engagemang vid laboratoriearbetet, Irene Persson som gjort utskriften samt Lars Melin som gjort ritningarna.

Stockholm i februari 1989

Per Johan Jönis

Christer Molin

1 SAMMANFATTNING

Permeabiliteten har en avgörande betydelse för betongens beständighet. Kunskaper om praktiska fältmässiga metoder för permeabilitetsmätning är för närvarande begränsade. Detta är inte tillfredsställande bl a ur kontroll- och diagnossynpunkt.

I denna undersökning har vi studerat och utvecklat Figgs metod. Utrustningen har bl a valts för att den är lätt att handha och för att den är fältmässig.

I det följande beskrivs metoden. Man borrar först ett hål med diameter 10 mm till ett djup av 40 mm. Hålet tätas från ytan med en 20 mm tjock tätning genom vilken en injektionsnål förs. Från hålets botten och upp till tätningen finns ett 20 mm högt hålrum med diameter 10 mm som utsätts för undertryck. Trycket sänks till något under 55 kN/m^2. Sedan mäter man den tid det tar för trycket att minska från 55 kN/m^2 till 50 kN/m^2.

Syftet med studien är att förbättra möjligheterna att mäta luftpermeabiliteten i betong på ett tillfredsställande sätt, särskilt avses då mätning i fält.

Undersökningen har bl a gett följande resultat och slutsatser.

Metoden är enkel att tillämpa. Noggrannhet krävs dock för att inte läckage skall uppstå. Exempelvis måste hålväggens övre del primas. Det tar ett dygn för tätningsmassan att härda. Det är önskvärt med betydligt kortare härdningstid. Metoden kan betraktas som icke förstörande eftersom lagningsbehovet är litet och lagning lätt att utföra.

De utförda kontrollerna på prover med förutbestämda permeabilitetsvariationer orsakade av olika materialkvalitet och efterbehandling visar att metoden är relevant. Detta styrks också av den goda korrelationen med den vedertagna syrgasdiffusionsmetoden. Repeterbara värden har erhållits.

Relativa fuktighetens stora betydelse för permeabiliteten redovisas. Vid 75-90 % RH sker en markant höjning av mätvärdena, dvs betongen blir snabbt tätare. Möjligheten att fältmässigt konditionera mätpartier, så att kravet på den kompletterande RH-mätningen utgår, bör studeras.

Förslag till minimikrav för några olika miljöklasser presenteras.

2 INLEDNING

2.1 Bakgrund

Betongens beständighet och resistens mot miljön/kemiska angrepp, har på grund av många skadade konstruktioner fått en ökad uppmärksamhet. Det täckande betongskiktet över armering och ingjutningsgods utgör ett mer eller mindre bra korrosionsskydd beroende på täckskiktets tjocklek och kvalitet. Cementhalt och permeabilitet har en avgörande betydelse för beständigheten. Ännu finns det inga normer för hur permeabiliteten skall mätas och resultaten tolkas. Detta gäller särskilt färdiga konstruktioner i fält.

Luften innehåller bl a syre, koldioxid och svaveldioxid. Dessa gaser har stor betydelse för den armerade betongens beständighet. Täckskiktets permeabilitet och fuktinnehåll har en avgörande betydelse för skyddet mot nedbrytande mekanismer försörjda av dessa gaser.

Tuutti/1982/ beskriver hur luftens koldioxid tränger in i betongen och reagerar med betongens kalciumhydroxid, varvid kalciumkarbonat bildas (karbonatisering). Vid denna reaktion sjunker betongens pH från nivån 12-13 till 8-9. Så länge pH ligger på nivå 12-13 är betongen ett bra korrosionsskydd, men när pH ligger under 9 har den korrosionsskyddande effekten upphört. I rapporten finns ett diagram där man kan utläsa hur lång tid det tar för karbonatisering att nå fram till armeringen. Diagrammet bygger på täckskiktets tjocklek samt karbonatiseringsdjupet efter ett visst antal år och återstående tid anses kunna bedömas. Täckskiktets kvalitet med avseende på permeabilitet tar man direkt ej hänsyn till i diagrammet. Man kan därför konstatera att diagrammet är avsett att användas vid bedömning av gamla (ca 20 år) konstruktioner men att det inte är tillämpligt för nyare konstruktioner där karbonatiseringen knappt kommit igång.

Flera metoder att mäta luftpermeabiliteten på plats i täckskiktet beskrivs i litteraturen, se t ex The Concrete Society/1985/ men ingen metod har slagit igenom dvs har visat sig vara lätt att handha, lätt att tolka mätvärdena från/eller ge rätt information om permeabiliteten.

Rubricerad metod bedömdes emellertid kunna vara tillämplig p g a sin enkla uppbyggnad och funktionsprincip.

2.2 Syfte

Syftet är att förbättra möjligheterna att mäta luftpermeabiliteten i betong, särskilt avses då mätning i fält och av täckskiktet. Tillförlitlighet, noggrannhet, repeterbarhet och praktisk tillämpbarhet studeras. Gas- och vätskefenomenen i betongens porstruktur belyses.

3 ALLMÄNT OM POROSITET OCH PERMEABILITET

3.1 Definitioner

Ordet permeabilitet används ofta slarvigt att täcka flera olika egenskaper och kan ibland även förväxlas med porositet.

"Porositet" är en volymsenhet som betecknar innehållet av porer vilka inte nödvändigtvis är förenade med varandra och som kanske därför inte tillåter passage av gas eller vätska.

"Permeabilitet" är en flödesenhet och definieras som den egenskap hos ett poröst material, vilken karakteriseras av hur lätt en vätska eller gas passerar igenom det under inverkan av tryckskillnad. Ordet permeabilitet är egentligen relaterat till flödet som sker under en påförd tryckskillnad men används ofta för att täcka andra transportmekanismer såsom kapillärsugning och diffusion.

3.2 Transportmekanismer i betong

"Adsorption" är en process då molekyler tas upp och fastnar på porytorna i betongen. Vid fysikalisk adsorption hålls molekylerna fast på ytan av "Van der Waalskraften". Vid kemisk adsorption hålls molekylerna fast på ytan på grund av att tekniska förband bildas.

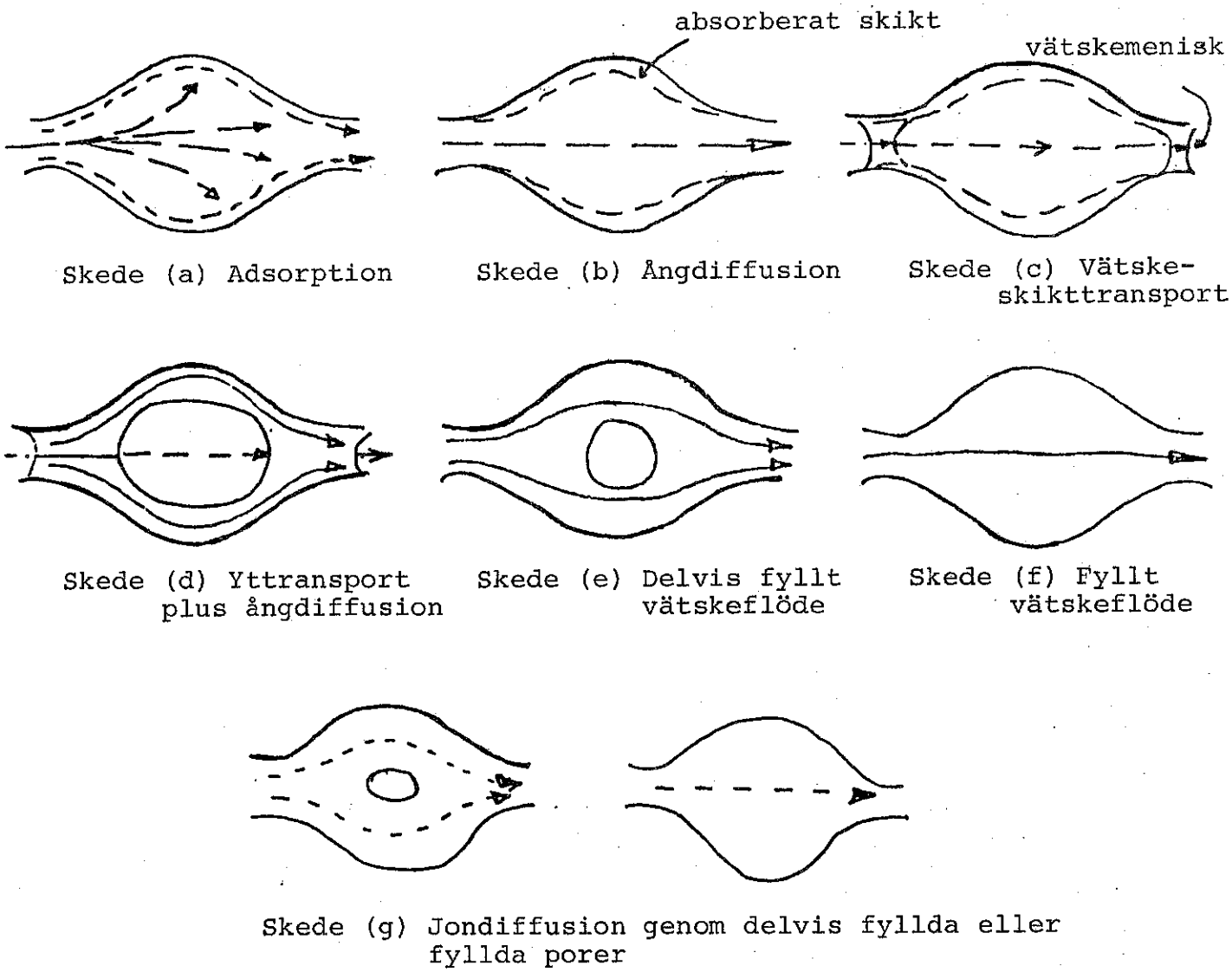
"Absorption" är den process då betongen tar upp vätska för att fylla tomrummen inne i materialet.

"Diffusion" kallas den process genom vilken en vätska, gas eller jon kan tränga genom betongen under inverkan av en koncentrationsgradient. Motsvarande materialkonstant "diffusiviteten" är den kvantitet av vätskan, gasen eller jonerna som per tids- och ytenhet passerar igenom betongen när koncentrationsgradienten = en enhet.

Betongens fukttillstånd vid provningstillfället har stor inverkan på mätvärden av flöde, absorption och diffusion. I många fall är betongen i ett mellanstadium då porerna fylls. Prover som tas från färdig konstruktion för laboratorieprovning kan konditioneras till ett kontrollerat fukttillstånd. För provningar i färdig konstruktion kan detta inte enkelt uppnås och åtgärder måste ibland vidtas innan en mätning kan göras.

3.3 Samband

Uttryck som beskriver olika mekanismer vid vattentransport, visas i figur 1, kan summeras enligt följande. Efter den inledande adsorptionen på porväggarna (skede a) passerar vattenånga genom betongen medelst diffusion (skede b).



Figur 1 **Idealiserad modell av rörelser hos vatten och joner inne i betongen**
The concrete Society /1985/

Detta skrivs enligt Ficks första lag som

$$J = D \frac{dc}{dl}$$

där J är flödet räknat som kvantitet per tids- och ytenhet, dc/dl är koncentrationsgradienten och D är diffusionskoefficienten. Då relativa fuktigheten ökar, kondenserar vatten i porens halsar. Halsarna tjänstgör som korta kretslopp (skede c) för ångans rörelser genom att förkorta den effektiva väglängden för ångdiffusion. I skede d sker flödet som tunna vätskefilmer, "ångassisterad" vätsketransport.

En menisk bildas inne i en kapillär på grund av en ökning av den relativa fuktigheten eller en extern vattenkälla. Krafter uppstår som ett resultat av tryckskillnaden över menisken och orsakar flöde genom kapillären (skede e). Flödeshastigheten V ges i Washburns ekvation:

$$V = \frac{(r\ \gamma L)}{4\ d\ \mu} \cos \theta \quad \text{där}$$

r = kapillärens radie

L = ytspänningen

d = inträngningsdjupet

μ = viskositeten

θ = kontaktvinkeln

När porsystemet är helt mättat flyter mediet som en vätska om ett tillräckligt högt tryck finns (skede f) och flödeshastigheten kommer då att styras av Darcys lag. Darcys lag definierar permeabiliteten i uttryck av mätbara kvantiteter och förklarar att i stationärt tillstånd är flödeshastigheten direkt proportionell mot tryckgradienten, dvs

$$V = \frac{Q}{A} = -Ki = -K \frac{dh}{dl} \quad \text{där}$$

V = flödeshastighet

Q = flödet

A = flödets tvärsnittsarea

i = tryckgradienten

dh = tryckfall över flödets väglängd dl

Konstanten K, som vid användande av vissa enheter har hastighetssort, beror både på vätskans och det porösa mediets egenskaper. Den kallas varierande för permeabilitetskoefficient, hydraulisk ledningsförmåga, läckkoefficient eller effektiv permeabilitet.

Darcy's lag är giltig bara för laminärt flöde och grundar sig helt på viskösa effekter.

Joner, sådana som t ex klorider, kan diffundera genom fritt vatten in i betongens porstruktur. Denna mekanism kan förekomma i skede C och D men är effektivast då betongen är genomblöt. Jondiffusionen finns också uttryckt i Fick's första lag, se ekvation (1).

Joner kan även medfölja inträngande vatten i samband med kapillärsugning s k konvektiv transport.

3.4 Enheter

De olika genomträngningskoefficienterna som ovan har diskuterats, anges i en mångfald enheter i litteraturen. I praktiken används ofta följande enheter:

	Beteckning	Enhet
Permeabilitetskoefficient	K	m/s 1)
Permeabilitet	k	m^2
Diffusionskoefficient	D	m^2/s

1) m^3 vätska per m^2 tvärsnittsarea per sekund och per gradient (m vattenpelare per m) = m/s

4 FIGGS METOD

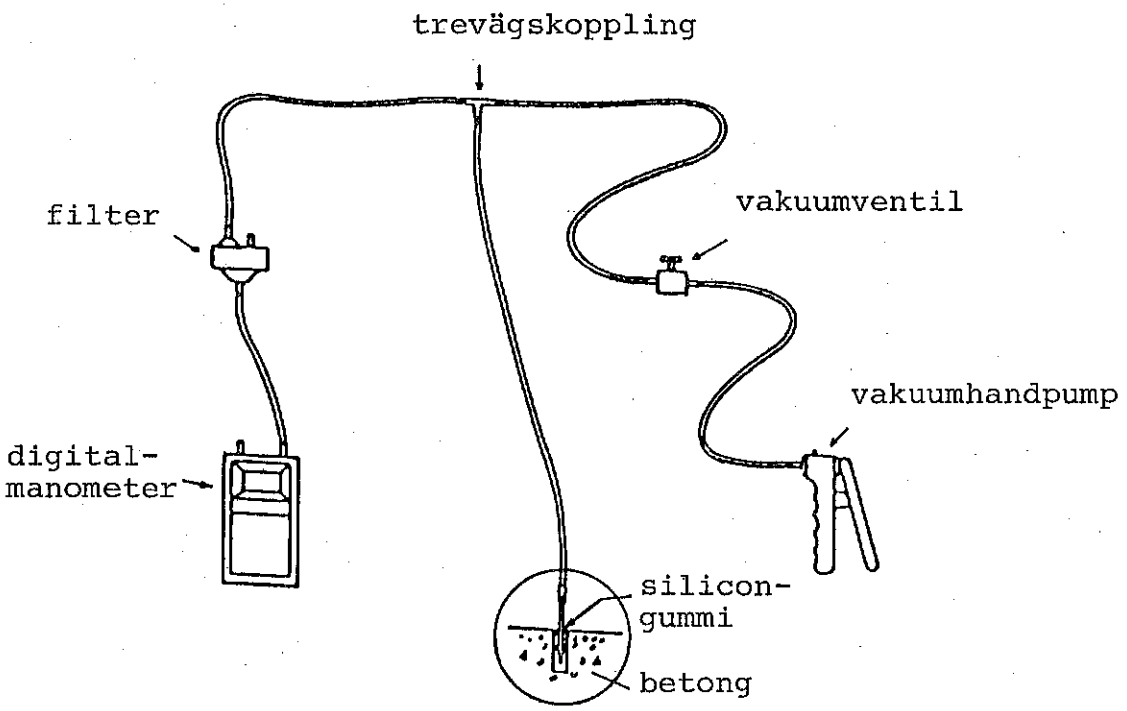
I början av 1970-talet utvecklades denna metod vid Building Research Establishment i England. Vissa förändringar av provningsmetoden har gjorts av Ove Arup med medarbetare för att göra den mer fältmässig. Bland annat har den ursprungliga kvicksilver/plastmanometern utbytts till en bärbar digital elektronisk manometer.

Det är denna modifierade metod som har studerats och som vi för enkelhetens skull kallar "Figgs metod".

4.1 Beskrivning av Figgs metod

Utrustning

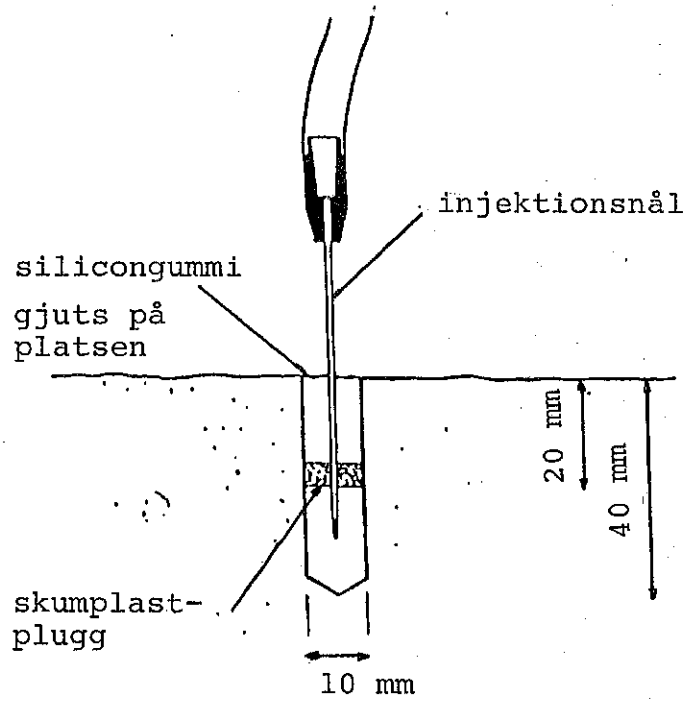
Utrustningen består av en injektionsnål som medelst en plastslang står i kontakt med en trevägskoppling. Från trevägskopplingen går plastslangar dels till en vakuumpump, dels till en digital manometer. På vägen till vakuumpumpen finns möjlighet att stänga av förbindelsen med pumpen och på vägen till manometern finns ett filter, se figur 2.



Figur 2 Ingående delar i utrustningen

Provningsutförande

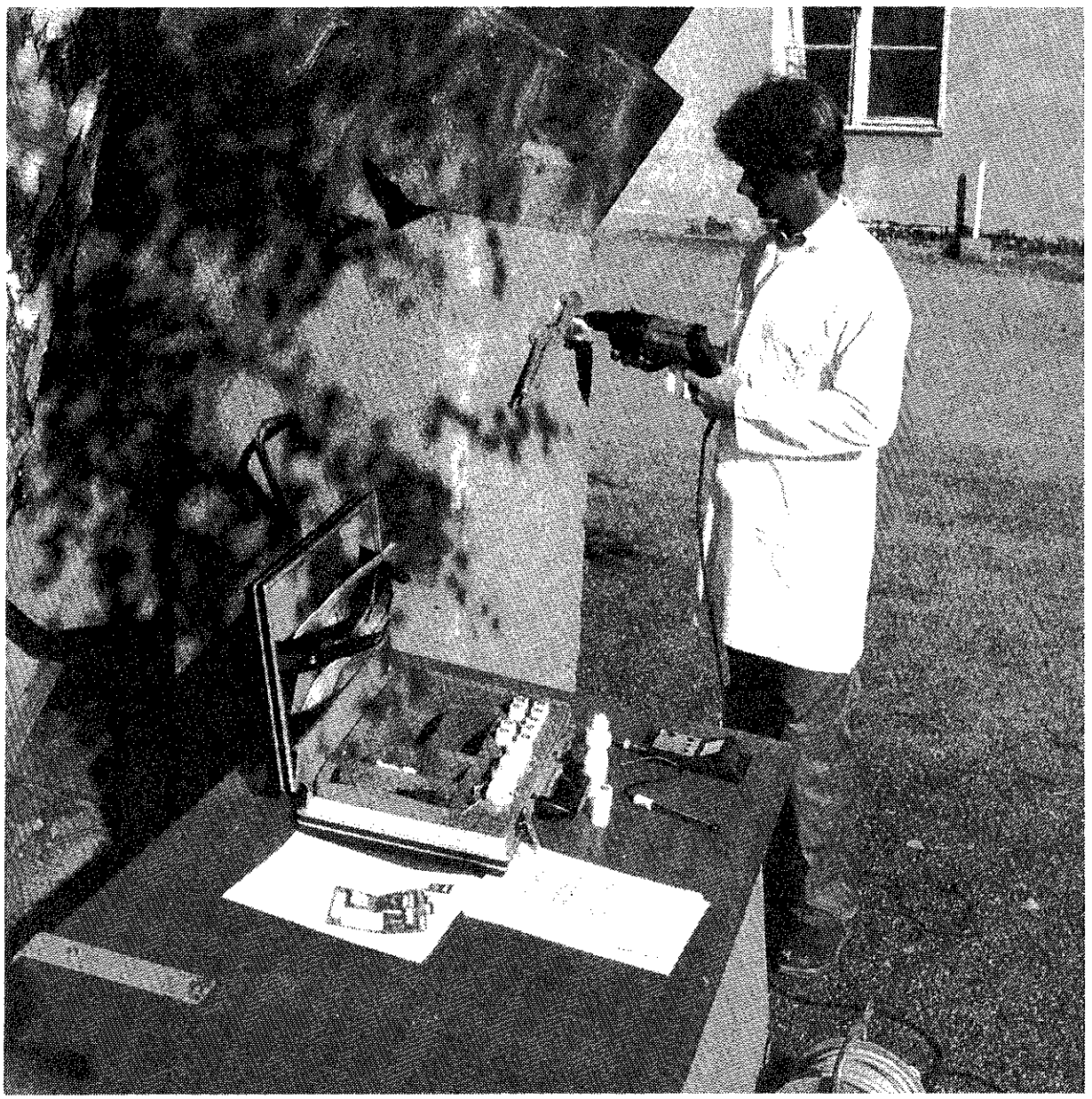
Man borrar ett hål med diameter 10 mm till ett djup av 40 mm. På ett djup av 20 mm placeras en bit skumplast som ansluter till hålväggen. Resten av hålet upp till betongytan fylls med tätningsmassa för att avgränsa luftrummet under skumplasten luft-tätt, se fig 3. Genom tätningsmassan och skumplasten sticks en injektionsnål. Den slagborrmaskin man använder skall vara effektiv. Man har funnit att vid långvarig borrning fastnar borrkaxet hårt på hålväggarna och gör det svårt att utföra en effektiv försegling.



Figur 3 Försegling av betongen

Provningshålet rengörs noggrant med en hård borste samt borrkaxet blåses bort. Det är viktigt att hålväggarna är ordentligt rengjorda för att förseglingen skall bli lyckad.

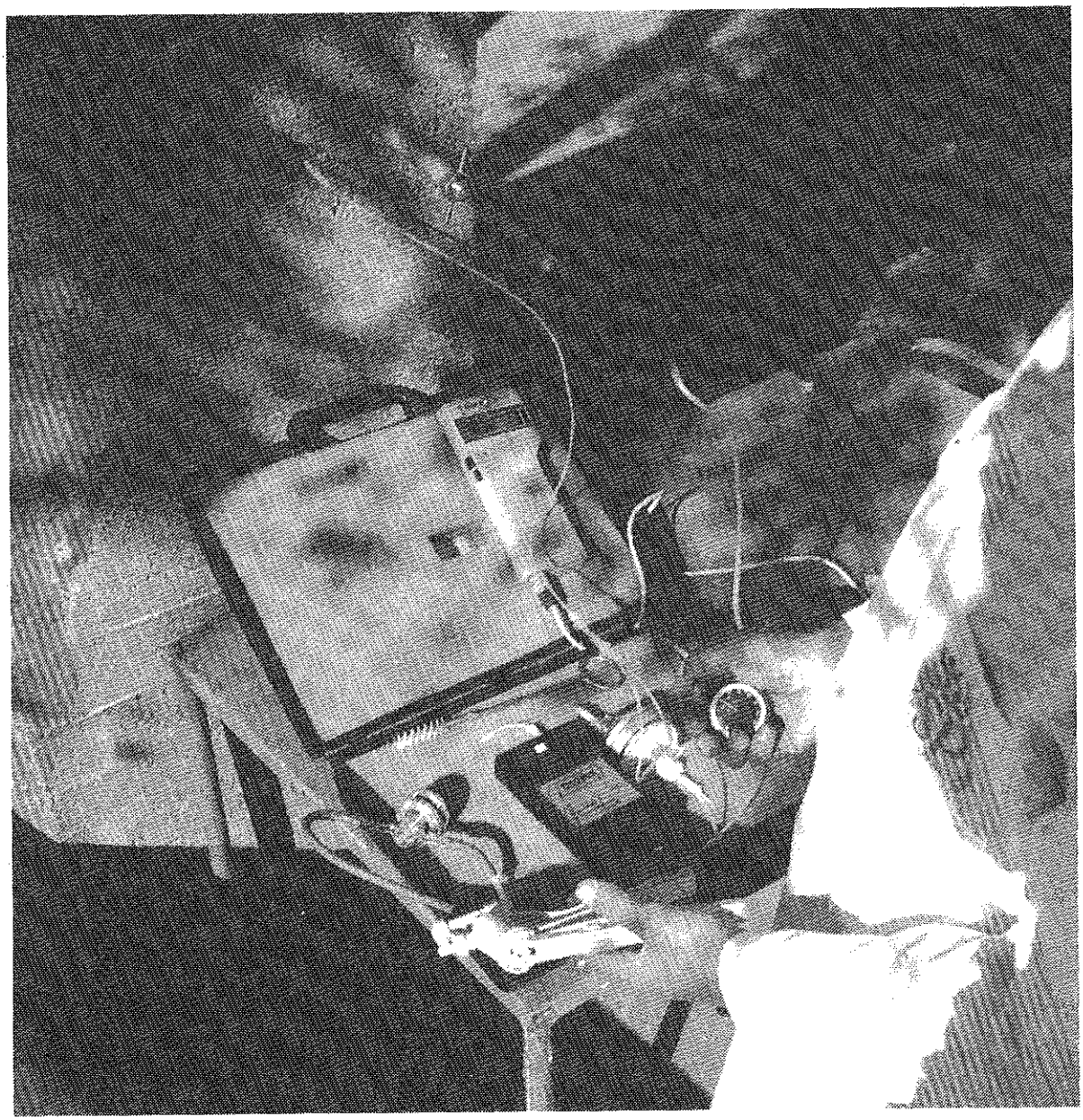
Skumplastbiten, som fungerar som form för tätningsmassan, kan lämpligen borras ut ur en skiva. Biten trycks ner i provhålet till exakt djup med hjälp av en märkt stång. Därefter fylls hålet från skumplasten till betongytan med silikongummi.



Figur 4 Mätning av betongens luftpermeabilitet enligt Figgs metod. Relativa fuktigheten mäts samtidigt.

Rättelse till SP RAPPORT 1988:43

Denna sida ersätter sidan 13 i SP RAPPORT 1988:43, Mätning av betongens luftpermeabilitet, av Per Jönis och Christer Molin.



Figur 4 Mätning av betongens luftpermeabilitet enligt Figgs metod. Relativa fuktigheten mäts samtidigt.

När silikongummit har stelnat pressas injektionsnålen genom gummitätningen. Det har visat sig fördelaktigt att föra in en ståltråd i nålen innan man trycker nålen genom silikongummit och sedan rensa röret för att vara säker på att inga gummipartiklar blockerar den trånga kanalen.

Provningsapparaten ansluts sedan till injektionsnålen och i hela utrustningen sänks trycket något mer än 55 kN/m^2 under atmosfärtrycket. Därefter stängs högvakuumventilen. Trycket kontrolleras på den digitala manometern och tiden börjar räknas exakt vid -55,0 kN/m^2.

Vid normala bruk och betonger registreras tiden som förflyter tills trycket når -50,0 kN/m^2. För vissa mycket täta material t ex polymerförstärkt betong, kan tiden bli olämpligt lång, varför tiden som åtgår för att trycket förändras 1 kN/m^2 multiplicerat med 5 ger en god uppskattning av den totala mätningstiden.

4.2 Osäkerhet i mätningsförfarandet

Man har antagit att Figgs mätutrustning mäter den tid det har tagit för luften att tränga in till den evakuerade håligheten för att skapa en tryckförändring på 5 kN/m^2. Emellertid visade det sig att under en serie experiment som utfördes i hastig följd av Ove Arup m fl, ökade genomträngningstiden. Detta stämde inte överens med det ursprungliga antagandet. Effekten undersöktes genom att bestämma genomträngningstiden hos en betongkärna före och efter det den tätats med polyuretan-lack. Ingen förändring i genomträngningstid kunde registreras. Viss risk för otäthet orsakad av nålen avfärdades vid ytterligare ett prov då det lackade provet helt sänktes ner i vatten. Ingen förändring i genomträngningstid registrerades. De utförda kontrollerna måste innebära att luft snarare drogs från porer inne i betongen än luftpenetretion från ytan.

Genomträngningstiden bestämd på ett visst betongprov beror på dess fuktinnehåll (genomblöt betong är praktiskt taget ogenomtränglig). Betonger med liknande exponering och därför troligen liknande fuktinnehåll kan provas för jämförelse med det aktuella mätningsförfarandet. Mer utförliga eller isolerade mätningar kräver att fuktinnehållet bestäms.

4.3 Föreslagen försöksklassificering

På basis av ett begränsat antal prov har Figg m fl /1984/ föreslagit en preliminär klassificering, se tabell 1.

Tabell 1 Föreslagen försöks-klassificering över cementbaserade material av skyddande kvalitet (prover konditionerade till konstant vikt vid 50°C)

Kvalitets-kategori	Tid sek	Bedömning	Materialtyp
0	<30	dålig	poröst material
1	30-100	måttlig	20 N/mm^2 betong
2	100-300	ganska bra	30-50 N/mm^2 betong
3	300-1000	bra	tät,välhärdad betong
4	>1000	utmärkt bra	polymerförstärkt betong

Denna klassificering redovisar ej härdning och fuktinnehåll i betongen. En mer nyanserad gradering framgår av punkt 7.6. I stort överensstämmer våra resultat med ovanstående tabell.

5 UTFÖRANDE OCH OMFATTNING

Provkropparna har tillverkats vid Statens provningsanstalts laboratorium i Borås. Följande egenskaper och åtgärder har stor betydelse för permeabiliteten. De har varierats enligt tabell 2:

Hållfasthetsklass	K15, K30, K45
Maximal stenstorlek	8 mm, 32 mm
Tillsatsmaterial	SiO_2, K30 med 10 %
Härdning	Normalhärdning vattenhärdning till 5 dygns ålder, lufthärdning
Relativ fuktighet	60 % - 90 %

Provkropparnas storlek valdes för:

Tryckhållfasthet	Kuber (150 mm)
Permeabilitet	Prismor (vattentäthet)
Bestämningar:	Vattencementtal (vct)
Betongmassa	Konsistens (sättmått)
	Lufthalt
	Volymvikt
Hårdnad betong	Tryckhållfasthet (7+28 dygn)
	Permeabilitet
	Syrgasdiffusion

Av tabell 2 framgår märkning av provkroppar samt olika variabler.

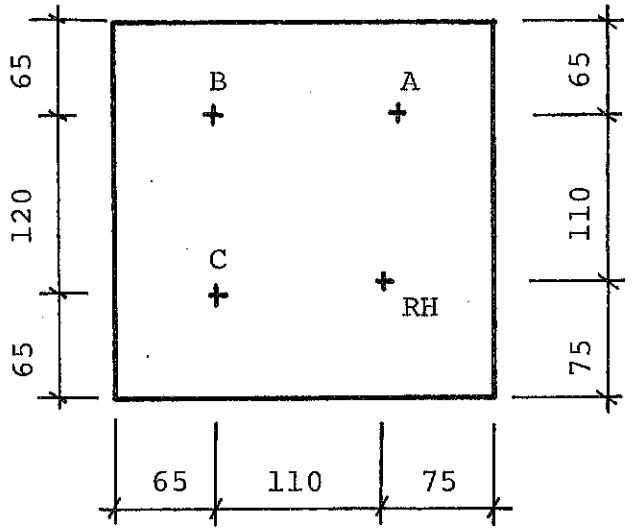
Tabell 2 Märkning av provkroppar samt olika variabler

Provkropp nr	Avsedd kvalitet	Tillsats-material kg/m^3	Maximal stenstorlek mm	Fukt-härdning
1-2	K15	-	32	luft
3-4	"	-	"	normal
5-6	K30	-	"	luft
7-8	"	-	"	normal
9-10	K45	-	"	luft
11-12	"	-	"	normal
13-14	K30	20	"	luft
15-16	"	"	"	normal
17-18	K15	-	8	luft
19-20	"	-	"	normal
21-22	K30	-	"	luft
23-24	"	-	"	normal
25-26	K45	-	"	luft
27-28	"	-	"	normal
29-30	K30	27,8	"	luft
31-32	"	"	"	normal
33-35	"	-	32	normal

Permeabilitetsmätningarna påbörjades först efter 3 månader. Det mesta av cementet har hydratiserat vid denna tidpunkt varför förloppet inte nämnvärt kan påverka mätvärdena. Detta var väsentligt eftersom mätningarna pågick under cirka 6 månader och det är viktigt att mätvärdena från början och slutet av perioden är jämförbara.

5.1 Applicering och teknik

I prisma 1-32 borrades 3 st hål per prisma. Vid tillverkningen av prisma 33-35 gjordes 2 st hål i den färska betongmassan samt borrades 2 st hål/prisma. Hålen borrades med en slagborrmaskin av märke AEG PHE 20 RL-N. Hålens diameter var 10 mm och djup 40 mm. Efter borrningen borstades hålväggarna rena från borrkax med en stålborste, varefter hålen blåstes rena med tryckluft. Dessutom borrades ett hål per prisma till ett djup av 40 mm för montering av fuktighetsmätare fabrikat Vaisala HM131. De borrade hålens placering framgår av figur 5.



Prismats tjocklek 120 mm

Figur 5 Placering av borrade hål, dels för Figg-mätning dels för mätning av relativ fuktighet

Ur en 3 mm tjock skumplastduk stansades pluggar som fördes ner i hålen så att undersidan på pluggen hamnade 20 mm under betongytan. I samband med att pluggen fördes ner i hålet monterades en injektionsnål i centrum av pluggen. Injektionsnålen var alltså fixerad i läge innan den lufttäta tätningen utfördes. Tätningarna utfördes av Sikaflex-11C som är en 1-komponents elastisk polyuretanfogmassa.

Innan Sikaflex-11C valdes provades lufttätheten genom att ett rör med diameter 18 mm och längd 38 mm fylldes med tätmassa. När tätmassan stelnat, efter cirka ett dygn, stacks en injektionsnål in i tätmassan och medelst vakuumpumpen skapdes ett undertryck på -55,0 kN/m^2. Därefter mättes tiden till dess undertrycket var -50,0 kN/m^2. Om den uppmätta tiden är lång får man dessutom en indikation på att mätutrustningen också är tät. Vid prov innan mätningarna påbörjats erhölls mätvärdet 4.800 sek och efter mätningarna 2.800 sek. Detta innebär att inverkan från utrustningen är liten för de undersökta betongkvaliteterna. En viss underskattning erhålles dock vid höga kvaliteter.

I samband med slagborrning i betong kan man misstänka att mikrosprickor uppstår i hålväggarna. Dessa sprickor kan sedan tjänstgöra som kanaler när trycket sänks i hålrummet och påverka mätvärdet. I prismorna 33-35 gjordes därför 2 st hål/prisma i samband med gjutningen. Hålen gjordes med en diameter av 10 mm och djup av 40 mm dvs samma storlek som de borrade hålen. Avsikten var att studera om det blev någon skillnad i mätvärden mellan de förtillverkade och de borrade hålen.

De borrade hålen visade betydande skillnader i mätvärden från hål i samma provkropp. Detta tyder på att sprickor uppstått i hålväggen under slagborrningen som tätmassan ej förmått täta. Vi beslöt oss därför för att utföra en primning av hålväggen ner till 20 mm djup dvs samma djup som tätningen har. Som primer valdes Sikaprimer 1. Efter primningen erhölls i stort lika värden för alla hål. Vid de fortsatta försöken primades därför hålen.

5.2 Kontroll av mätningsförfarandet

Av punkt 3.2 framgår att luften troligtvis inte bara sugs från ytan utan även från det omgivande porsystemet. I det följande beskrivs storleksordningen på denna störning och en enkel åtgärd för att eliminera densamma.

För att se om vi också skulle erhålla liknande resultat gjordes vid en första försöksserie 14 st mätningar i snabb följd. Vid de tre första mätningarna som gjordes helt enligt instruktionerna, erhölls mätvärdena 13, 13, och 14 sek. Vid mätning 4-11 öppnades vakuumventilen så att systemet var öppet fram till vakuumpumpen. Mätvärdena varierade då mellan 15 sek och 16 sek. Vid mätningar 12-14 sänktes trycket först ner till -80 kN/m^2. Samtliga tre mätvärden var 13 sek.

Av ovanstående mätserie framgår att man får olika mätvärden om vakuumventilen är öppen eller stängd. När vi sänkte trycket till -80 kN/m^2 erhölls samma mätvärde vid samtliga mätningar. En förklaring kan vara att när trycket förändras från -80 kN/m^2 till -55 kN/m^2 sugs luft från porer intill hålrummet och betongytan samt då trycket förändras från -55 kN/m^2 till -50 kN/m^2 sugs luft enbart från betongens yta. Det inledande stora undertrycket suger förmodligen ut lättillgänglig luft i porsystemet.

5.3 Valt mätningsförfarande

Vid fortsatta försök har vi upprepat mätningen tre gånger direkt efter varandra i varje hål. Vi har sänkt trycket till ungefär -80 kN/m^2 samt påbörjat mätningen då trycket varit -55 kN/m^2 och avslutat då trycket varit -50 kN/m^2. Avsikten med detta förfarande har varit att först tömma det omgivande porsystemet på luft innan själva mätningen påbörjades.

5.4 Variation av betongens relativa fuktighet

Betongens relativa fuktighet är av avgörande betydelse för mätvärdet. Därför mättes betongens relativa fuktighet, RH, i samband med permeabilitetsmätningarna.

För att studera inverkan av RH på permeabilitetsmätvärdet placerades en del av provkropparna i ett konditioneringsrum med 90 % RH och 20°C under cirka en månad. Därefter torkades provkropparna ut i rumsluft. Mätningar gjordes vid RH ca 90 %, 75 % och 60 %. Temperaturen var 20°±3°C.

Vid vattenmättad betong fylls porer och kapillärer och tillåter inte transport av luft. För att prova detta placerades en del av provkropparna i vatten. Vattnets temperatur var 20°C±2°C.

6 RESULTAT

Vid tillverkning av betongmassa gjordes bestämningar enligt kapitel 4. För att bedöma hållfasthetsklass provades tryckhållfastheten vid 7 och 28 dygn. I tabell 3 redovisas provningsresultaten från tryckhållfasthetsprovningen och bestämning av vct.

Tabell 3 Resultat från hållfasthetsprovningar och vct-bestämningar

Provkropp Nr	Avsedd kvalitet	Cementhalt Kg/m^3	Vct	Tryckhållfasthet 7 dygn MPa	Tryckhållfasthet 28 dygn MPa
1-2	K15	195	0,87	15	20
3-4	"	"	"	17	22
5-6	K30	240	0,72	22	27
7-8	"	"	"	24	32
9-10	K45	350	0,51	37	43
11-12	"	"	"	43	53
13-14	K30	200	0,90[1)]	19	27
15-16	"	"	"	23	36
17-18	K15	248	0,88	15	21
19-20	"	"	"	18	23
21-22	K30	300	0,75	18	22
23-24	"	"	"	21	26
25-26	K45	410	0,51	33	39
27-28	"	"	"	38	46
29-30	K30	278	0,86[2)]	15	23
31-32	"	"	"	20	32

1) Vattenbindemedelstalet (vbt) = 0,81
2) -"- = 0,79

6.1 Primningens inverkan

Permeabilitetsprovningen för primad resp. oprimad hålvägg redovisas i bilaga 1. Av mätningarna framgår att primningen som regel har medfört ett högre mätvärde. Detta tyder på att eventuella sprickor och kanaler som eventuellt uppstår vid slagborrningen tätas till vid primningen och att anslutningen mellan tätning och hålvägg blir bättre.

I bilaga 1 redovisas också mätningarna på provkroppar med både förtillverkade och borrade hål.

6.2 Relativa fuktighetens inverkan

I bilaga 2 redovisas mätvärden för varierande relativ fuktighet. Av mätvärdena framgår att permeabiliteten minskar vid ökande relativ fuktighet. Hos en betong som normalhärdats minskar permeabiliteten vid högre relativ fuktighet fortare än hos en lufthärdad betong.

6.3 Samband - diagram

I en serie diagram jämförs de olika parametrarnas inverkan på mätvärdena. Eftersom flera parametrar samtidigt kan påverka mätvärdet redovisas samtliga ingående parametrar i diagrammen. Diagrammen redovisas i bilaga 1 och 2.

7 KORRELATION TILL VEDERTAGEN LABORATORIEMETOD

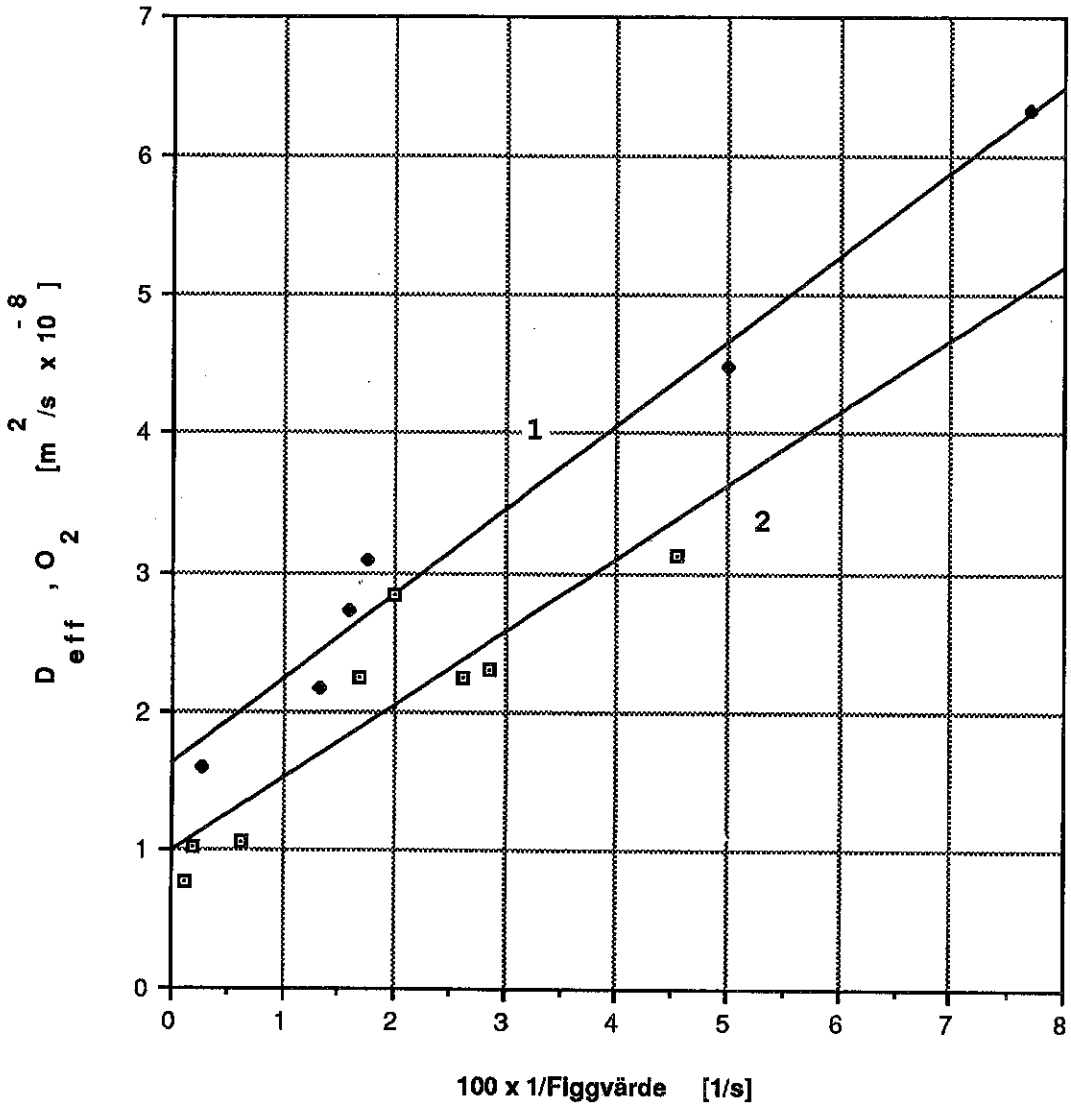
För att studera om metoden överensstämmer med vedertagna laboratoriemetoder har syrgasdiffusionsmätningar utförts på provkroppar uttagna från de provade prismorna. Ur 17 st prismor borrades en cylinder med diameter ca 100 mm. Cylindern uttogs centriskt i prismat. Från den övre delen av cylindern (överytan på prismat) kapades en ca 20 mm tjock skiva. Gjuthud och ojämnheter i överytan slipades bort.

I bilaga 4, CBI Rapport 88053, beskrivs provningsmetoden. Resultat från analysen anges som effektiv diffusionskoefficient med sorten m^2/s dvs inte alls samma sort som mätvärden erhållna med Figgs metod. Mätvärdena är inte direkt jämförbara dels beroende på olika sort och dels beroende på att man mäter effekten av olika typer av gradient. Med Figgs metod utsätts betongen för en tryckgradient och vid syrgasdiffusionsmätningar för en koncentrationsgradient (O_2).

Mätvärdena bör ändå kunna jämföras för att verifiera metodens tillförlitlighet. För att kunna göra denna jämförelse har vi inverterat mätvärdena erhållna med Figg-metoden. De sålunda erhållna värdena anger samma tendens som vid syrgasdiffusion, dvs en tät betong ger ett lågt mätvärde och en otät betong ett högt mätvärde. För att komma på samma storleksnivå som syrgasdiffusionsvärdena har de inverterade Figg-värdena multiplicerats med 100. I tabell 4 redovisas syrgasdiffusionsvärdena samt de omräknade Figg-värdena. En jämförelse mellan metoderna görs i figur 6. Där uttrycks sambanden mellan syrgasdiffusion och mätvärdena enligt Figg-metoden som regressionslinjer. Korrelationen är mycket god.

Tabell 4 Mätvärden från syrgasdiffusion och mätningar med Figgs metod

Prisma Nr	$D_{eff} \cdot 10^{-8}$ m^2/s	Figg (RH ca 70%) s	Figg $\frac{100}{\text{mätvärde}}$
2	3,13	22	4,55
4	2,84	50	2,00
6	2,25	38	2,63
8	2,15	142	0,70
10	2,25	60	1,67
11	1,01	517	0,19
12	0,77	860	0,12
14	2,31	35	2,86
16	1,06	162	0,62
18	6,33	13	7,69
20	1,93	38	2,63
22	6,63	28	3,57
24	2,73	63	1,59
26	3,08	57	1,75
28	1,60	374	0,27
30	4,49	20	5,00
32	2,17	75	1,33



1	D_{eff} 8 mm	y = 1,6093 + 0,60943x R=0,99
2	D_{eff} 32 mm	y = 0,98742 + 0,52737x R=0,90

Figur 6 Samband mellan syrgasdiffusion och Figg-värden

8 KOMMENTARER OCH SLUTSATSER

8.1 Praktisk tillämpbarhet

Metoden är enkel att tillämpa. Noggrannhet krävs dock för att få tätningen perfekt. Genom att prima hålväggarna minskar riskerna att små sprickor, som uppstått under slagborrningen i anslutningen mellan tätmassan och hålväggen, finns kvar. Tiden för tätmassan att härda är cirka ett dygn vilket innebär att det är lämpligt att montera nålen och göra tätningen ena dagen samt utföra mätningarna nästa dag.

Anslutningen till injektionsnålen måste vara tät. Det finns alltid risk för att ett litet sandkorn kan fastna på nippelns yta och därmed göra att anslutningen blir otät. Det är alltså av stor vikt att nippeln torkas av innan den ansluts till injektionsnålen.

Metoden kan betraktas som icke förstörande eftersom lagningsbehovet är litet och lagningen mycket lätt att utföra, t ex med cementbruk.

8.2 Tillförlitlighet

De utförda kontrollerna på prover med förutbestämda permeabilitetsvariationer orsakade av olika materialkvalitet och efterbehandling visar att metoden verkligen mäter permeabiliteten. Detta styrks också av den goda korrelationen med syrgasdiffusionsmetoden.

Låghållfast betong har en öppen struktur med stor permeabilitet. En höghållfast betong däremot har en mycket tät struktur med liten permeabilitet. Som framgår av bilagorna 1 och 2 ger mätningar enligt Figg-metoden en bild som överensstämmer med den förväntade.

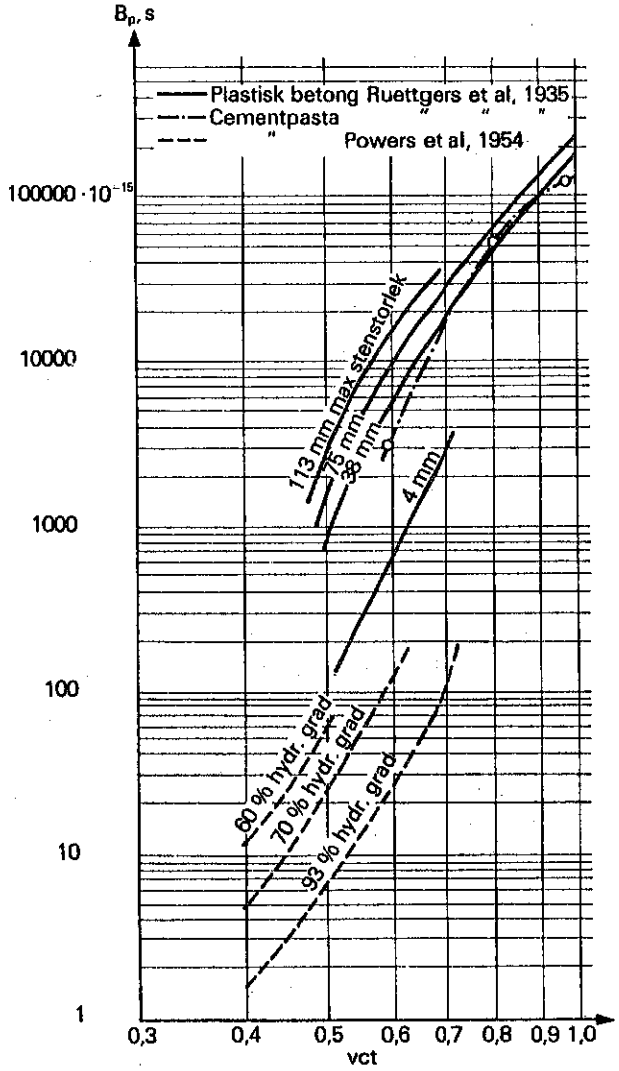
Fukthärdning av betong ökar tätheten avsevärt för täckskiktet. I den nyare litteraturen hänvisas till Andersson/Petterson/1987/. Denna undersökning visar att de yttre 20 mm av betongen, normalt täckande skikt över armeringen, vid utebliven fukthärdning för en K 45 sjunker till nivån för en normalhärdad (5 dygns vattenhärdning) K 15. Med tanke på armerade betongkonstruktioners beständighet är det alltså av största vikt med fukthärdning, beroende på om omgivande miljö under brukstiden är mer eller mindre aggresiv (utomhus, klorider, kemikalier m m).

8.3 Noggrannhet, repeterbarhet

Vid bestämning av permeabiliteten i ett hål gjordes, med några få undantag, tre mätningar samt medelvärdet beräknades. Nästan vid samtliga bestämningar har mätvärde ett, två och tre varit så gott som identiska. Repeterbarheten kan alltså anses som god.

8.4 Maximala stenstorlekens betydelse

Enligt Betonghandboken /1980/, ökas permeabiliteten när ballastens maximala kornstorlek ökas vid samma vct. Som grund för detta uttalande hänvisas till diagram av Ruettgers et al och Powers et al (fig 7). Diagrammet visar betongens vattenpermeabilitet.



Figur 7 Betongs vattenpermeabilitet B_p uttryckt som cementpastafasens permeabilitet. Ruettgers et al (1935) och Powers et al (1954) ur Bergström et al (1977). Betonghandboken /1980/.

Vid våra försök har vi fått motsatt resultat dvs luftpermeabiliteten är lägre, materialet är tätare, vid maximal stenstorlek 32 mm än vid maximal stenstorlek 8 mm. Även vid jämförande provning med syrgasdiffusion, se kapitel 6, kan vi avläsa denna tendens. Visserligen har vi inte exakt samma vct resp vbt vid maximal stenstorlek 8 mm och 32 mm för K 15, K 30 och K 30 med SiO_2 men skillnaden är liten, se tabell 3. K 45 har dock samma vct både för maximal stenstorlek 8 mm och 32 mm.

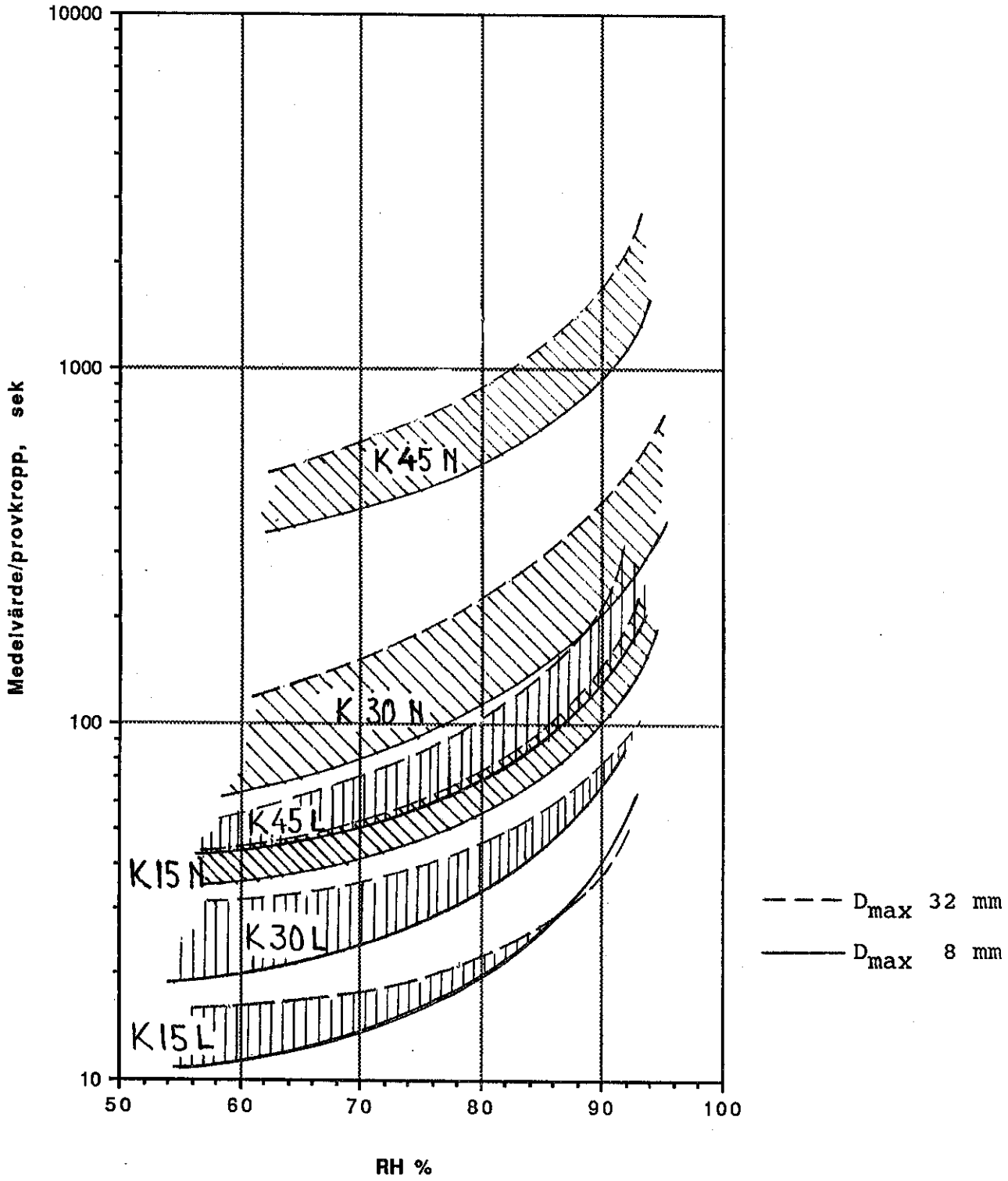
Man kan spekulera i orsakerna till att vi har fått avvikande resultat. Fasgränserna mellan cementpasta och ballast anges bli svagare när ballastpartiklarna blir grövre. En orsak kan tänkas vara att vi kanske har använt ett renare ballastmaterial än vid tidigare försök. Föroreningar (damm) i olika former som sitter på stenmaterialets ytor medför svagare fasgränser. Stenmaterialets ytråhet, makadam eller singel, inverkar också på fasgränsens styrka och därmed permeabiliteten. Ökad stenstorlek innebär minskad andel cementpasta, vilket å andra sidan bör ge minskad permeabilitet. Eventuell vattenseparation hos betongmassan, med förhöjt vct under större ballastkorn, får man förutsätta inte har förekommit vid någon av undersökningarna.

När kiseldioxid (SiO_2) ersätter en del av cementet bör strukturen bli tätare eftersom kiseldioxidens kornstorlek är betydligt mindre än cementets. Eftersom vi endast har arbetat med en tillsatsmängd, 10 % av cementvikten, kan vi inte uttala oss med säkerhet om kiseldioxidens inverkan. Det vi kan utläsa av våra resultat är att den inte gör betongen tätare, snarare får den en större permeabilitet och är känsligare för utebliven vattenhärdning.

8.5 Relativa fuktighetens betydelse

Den relativa fuktigheten inverkar kraftigt på permeabiliteten. Man vet att då RH är 100 % är porer och kapillärer fyllda med vatten och luft-gas kan inte tränga in i betongen. Permeabiliteten ökar sedan i takt med att RH minskar ner till en stabil nivå. Några mätvärden för Figg-metoden har ej varit tillgängliga.

Våra resultat visar att då RH ligger i storleksordningen 75 - 90 % sker en markant höjning av mätvärdena, dvs betongen blir snabbt tätare. Vid hög kvalitet sker höjningen vid lägre RH än vid låg kvalitet.



Figur 8 Den relativa fuktighetens inverkan på mätvärdet

8.6 Förslag till minimikrav för luftpermeabiliteten

Kraven måste ställas vid en bestämd relativ fuktighet, förslagsvis 70 %. Vid denna nivå påverkas mätvärdena ej så mycket av fukten. Med stöd av miljöindelning och krav på vct enligt BBK 79, tabell 7-3, samt resultat från undersökningen kan följande minimikrav uppställas, se tabell 5. Av tabellen framgår vattenhärdningens stora betydelse för betongens täthet.

Tabell 5 Förslag till minimikrav för luftpermeabilitet vid 70 % ± 5 % relativ fuktighet. Stenmax 8 och 32 mm.

Klass	Miljö	Vct	Tid sek	lufthärdad	normalhärdad
1	Obetydl. arm. - aggresiv miljö	-	<100	K15,K30, K30S,K45	K15
2	Måttl. arm. - aggresiv miljö	0,70	100-400		K30,K30S 1)
3	Mycket arm. - aggresiv miljö	0,50	>400		K45 2)

1) K30S med stenmax 8 mm uppfyller ej kravet, medeltal av 8 mätningar = 91 sek

2) K45 med stenmax 8 mm uppfyller ej kravet, medeltal av 6 mätningar = 352 sek

9 FÖRSLAG TILL VIDAREUTVECKLING

Som framgått av undersökningen har den relativa fuktigheten stor inverkan på mätvärdet. Utomhuskonstruktioner har ofta hög relativ fuktighet, vilket försvårar tolkningen av mätvärden erhållna med Figgs metod. Fuktberoendet är även en praktisk svårighet p g a att RH-mätning behöver utföras i samband med Figg-mätning. Önskvärt vore om man kunde konditionera eller torka ut mätområdet på ett enkelt sätt så att behovet av RH-kontroll eventuellt försvinner och så att störningar av fukten försvinner. Man bör därför närmare studera uttorkningsmöjligheterna i detalj i utomhuskonstruktioner.

Fler mätningar av relativa fuktighetens inverkan bör göras, så att gaspermeabiliteten kan uppskattas ur ett större underlag.

Karbonatiseringen har troligen betydelse för permeabiliteten. Dess inverkan bör belysas i jämförande laboratorieförsök.

Tätningsmassa med kortare härdningstid är önskvärd. Tätning och mätning bör kunna göras samma dag.

10 REFERENSER

[1] Tuutti, K. — Corrosion of steel in concrete. CBI Fo 4:82, Stockholm, 1982.

[2] The Concrete Society — Permeability of Concrete. Papers for a one-day Conference, London, 12 December 1985.

[3] Rombén, L. — Beständighet och permabilitet. En litteraturstudie. CBI-Rapport 8532, Stockholm 1985.

[4] Andersson, C och PETERSSON, P-E — Härdningens inverkan på betongs permeabilitet och beständighet. Statens provningsanstalt, Byggnadsteknik, SP-Rapp 1987:07.

[5] Betonghandbok — Material. Svensk Byggtjänst, Stockholm 1980.

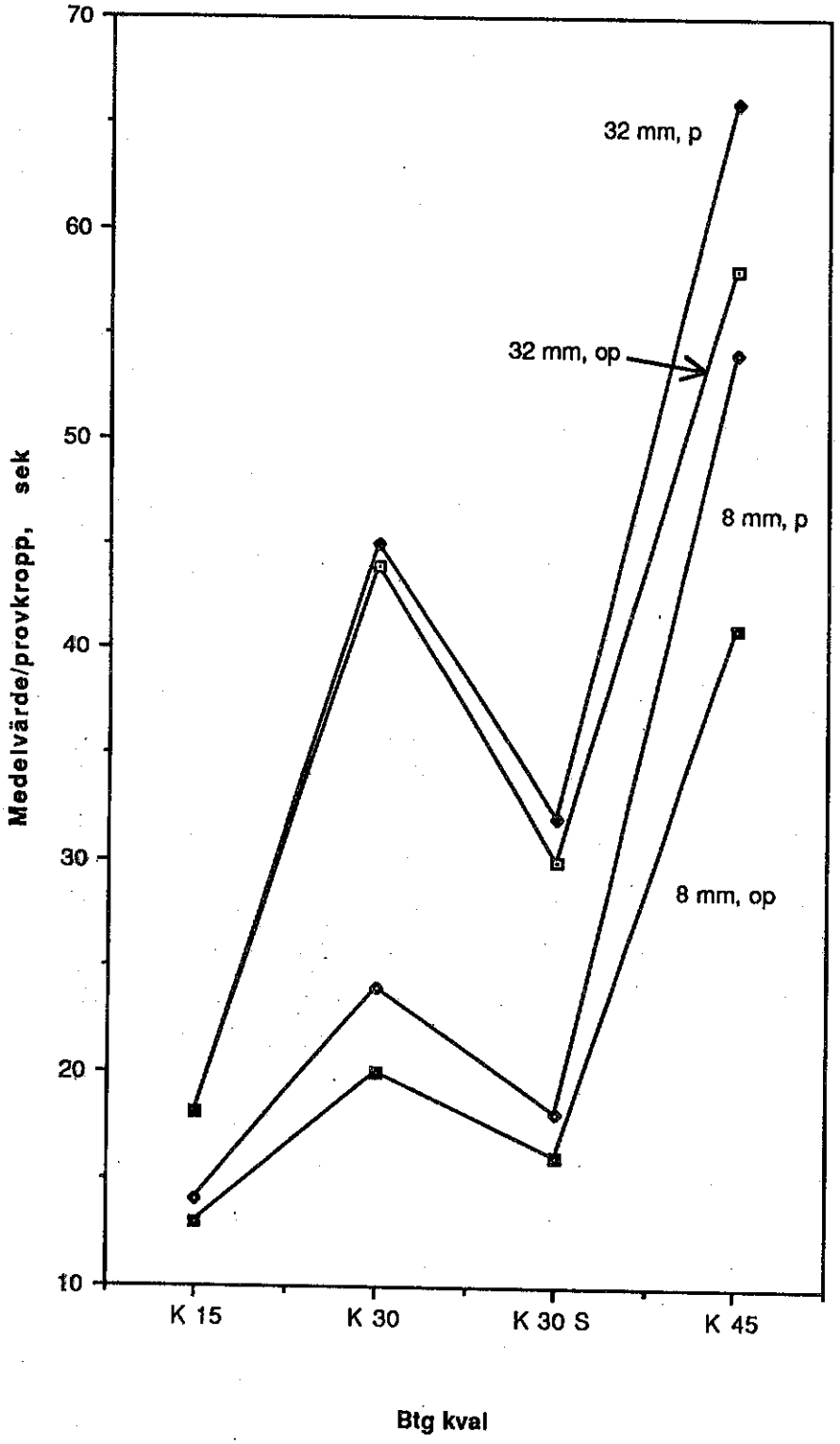
[6] Cather, R, Figg, J.W, Marsden, A.F and O'Brien, T.P. — Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete. Magazine of Concrete Research: Vol. 36, No 129. December 1984.

[7] Grube, H and Lawrence, C.D — Permeability of concretes to oxygen. Cembureau 1985.

[8] BBK 79 — Bestämmelser för betongkonstruktioner. Band 2. Material, utförande, kontroll. Stockholm 1979.

Resultat från mätningar enligt Figg-metoden på lufthärdade provkroppar. Jämförelse mellan primad och oprimad hålvägg.

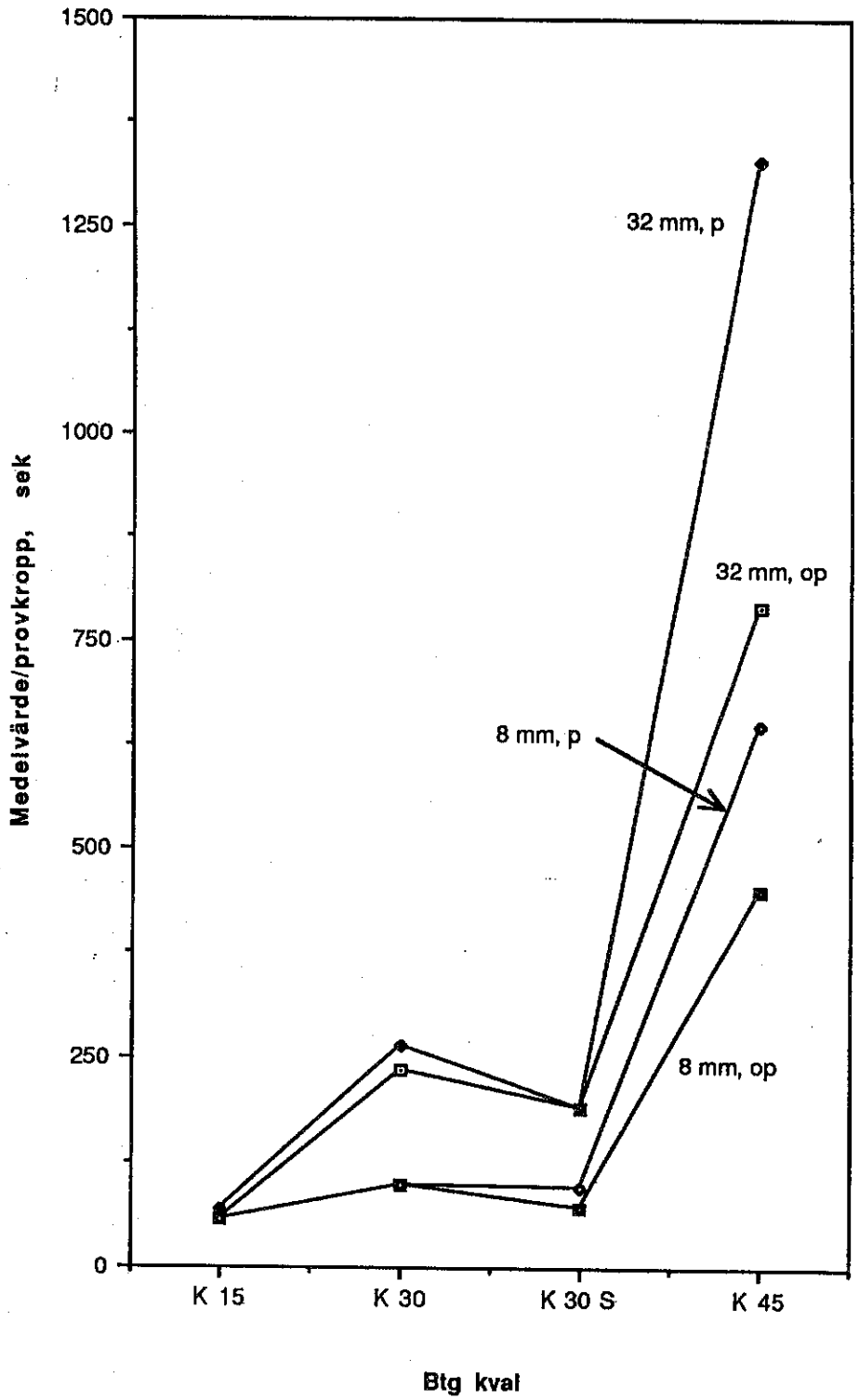
Prov-kropp nr	Betong-kvalitet	Sten max mm	Kisel-dioxid %	Prim-ning	Figg-mätning Medelvärde/hål Sek			Medelv/provkropp Sek
1	K15	32		nej	14	17	18	16
1	"	"		ja	13	15	14	14
2	"	"		nej	17	23	16	19
2	"	"		ja	21	26	19	22
5	K30	"		nej	47	41	64	51
5	"	"		ja	52	39	62	51
6	"	"		nej	34	32	48	38
6	"	"		ja	34	31	50	38
9	K45	"		nej	72	79	58	70
9	"	"		ja	76	102	75	84
10	"	"		nej	32	52	56	47
10	"	"		ja	36	53	54	48
13	K30	"	10	nej	-	-	-	-
13	"	"	"	ja	27	26	33	29
14	"	"	"	nej	32	30	28	30
14	"	"	"	ja	38	38	30	35
17	K15	8		nej	13	13	13	13
17	"	"		ja	14	15	14	14
18	"	"		nej	11	13	12	12
18	"	"		ja	12	15	13	13
21	K30	"		nej	17	21	16	18
21	"	"		ja	19	22	18	20
22	"	"		nej	22	22	25	23
22	"	"		ja	25	27	31	28
25	K45	"		nej	29	36	50	38
25	"	"		ja	42	42	67	50
26	"	"		nej	36	54	42	44
26	"	"		ja	44	74	53	57
29	K30	"	10	nej	-	-	-	-
29	"	"	"	ja	17	17	15	16
30	"	"	"	nej	14	18	16	16
30	"	"	"	ja	16	23	20	20



Jämförelse mellan primad och oprimad hålvägg hos lufthärdade provkroppar

Resultat från mätningar enligt Figg-metoden på normalhärdade provkroppar. Jämförelse mellan primad och oprimad hålvägg.

Prov-kropp nr	Betong-kvalitet	Sten max mm	Kisel-dioxid %	Prim-ning	Figg-mätning Medelvärde/hål Sek			Medelv/provkropp Sek
3	K15	32		nej	77	71	45	64
3	"	"		ja	70	59	51	60
4	"	"		nej	52	45	54	50
4	"	"		ja	70	69	87	75
7	K30	"		nej	283	256	364	301
7	"	"		ja	261	216	232	236
8	"	"		nej	159	185	161	168
8	"	"		ja	367	241	253	287
11	K45	"		nej	844	1372	883	1033
11	"	"		ja	1474	1340	910	1241
12	"	"		nej	487	755	404	549
12	"	"		ja	1363	1335	1554	1417
15	K30	"	10	nej	-	-	-	-
15	"	"	"	ja	170	131	192	164
16	"	"	"	nej	149	214	201	188
16	"	"	"	ja	192	239	207	213
19	K15	8		nej	78	65	77	73
19	"	"		ja	66	56	70	64
20	"	"		nej	32	51	36	40
20	"	"		ja	48	57	42	49
23	K30	"		nej	149	116	85	117
23	"	"		ja	102	104	90	99
24	"	"		nej	69	74	93	79
24	"	"		ja	111	99	90	100
27	K45	"		nej	534	804	567	635
27	"	"		ja	763	890	661	771
28	"	"		nej	268	243	291	267
28	"	"		ja	441	493	635	523
31	K30	"	10	nej	-	-	-	-
31	"	"	"	ja	106	63	93	87
32	"	"	"	nej	99	39	76	71
32	"	"	"	ja	131	67	107	102



Jämförelse mellan primad och oprimad
hålvägg hos normalhärdade provkroppar

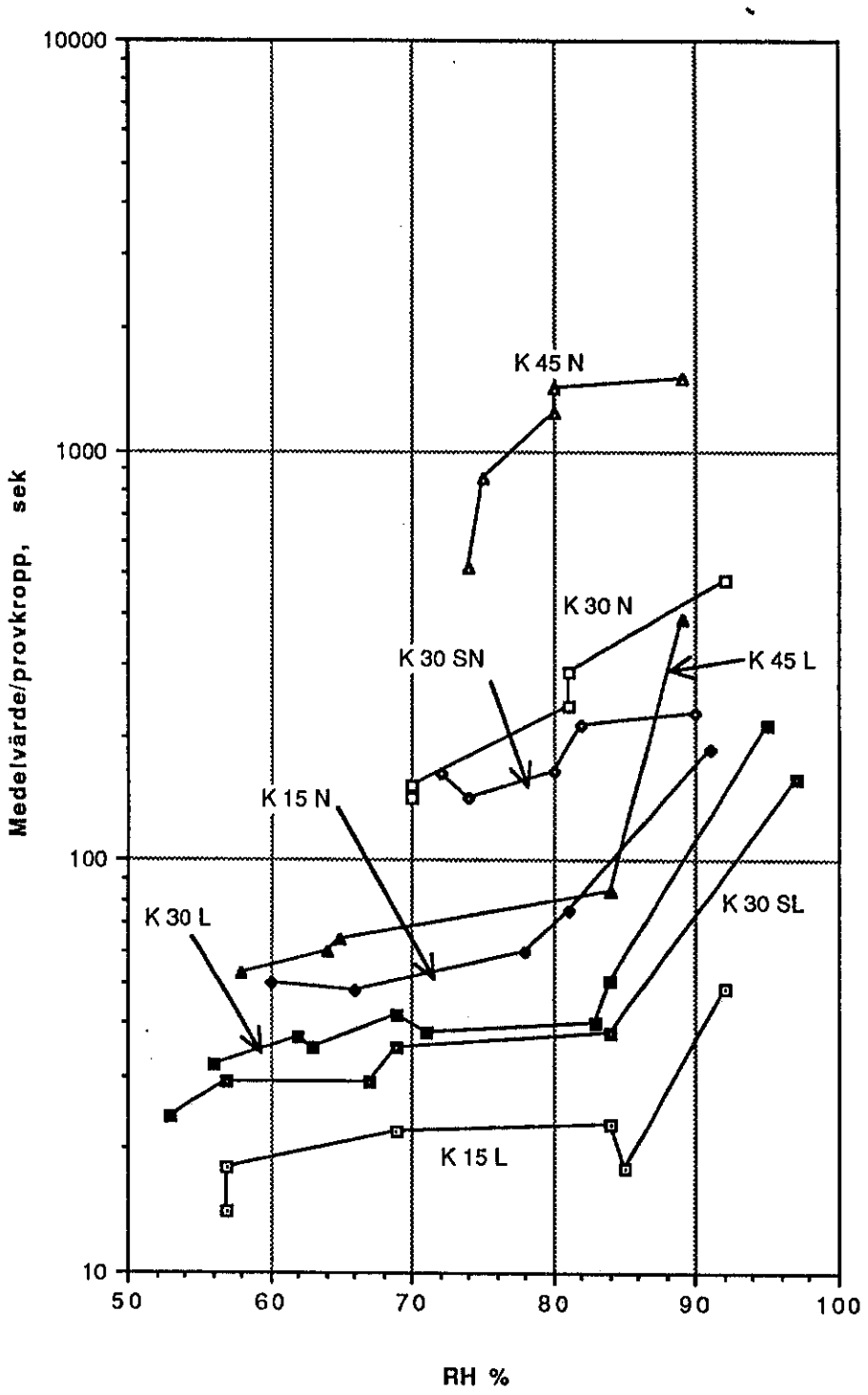
Resultat från mätningar enligt Figg-metoden på provkroppar med både förtillverkade och borrade hål.

Prov-kropp nr	Betong-kvalitet	Figg-mätning Förtillverkade Enstaka sek		Förtillverkade Medel sek	Borrade Enstaka sek		Borrade Medel sek	Differens förtillverkade: borrade sek	%
33	K30	64	66	65	66	49	58	+7	11
34	"	70	58	64	53	69	61	+3	5
35	"	86	78	82	53	66	60	+22	27
Samtl.				70			60	+10	14

Resultat från mätningar enligt Figg-metoden vid varierande relativ fuktighet (RH). Primad hålvägg och maximal stenstorlek 32 mm.

Prov kropp nr	Betong-kvalitet	Temp. °C	RH %	Figg-mätning Medelvärde/hål Sek			Medelv/provkropp Sek
1	K15	19	57	13	15	14	14
	"	23	85	16	19	18	18
	"	18	92	46	57	45	49
2	"	21	57	17	21	16	18
	"	22	69	21	26	19	22
	"	21	84	22	27	20	23
3	"	22	66	56	47	42	48
	"	22	78	70	59	51	60
	"	20	91	223 1)	194 1)	142 1)	186
4	"	21	60	48	48	55	50
	"	22	81	70	69	87	75
5	K30	20	62	37	30	45	37
	"	21	69	42	33	51	42
	"	23	84	52	39	62	51
	"	18	95	163 2)	185 2)	294 2)	214
6	"	20	56	29	25	41	32
	"	21	63	32	28	45	35
	"	23	71	34	31	50	38
	"	21	83	37	32	52	40
7	"	23	70	162	136	156	151
	"	21	81	261	216	232	236
	"	20	92	478 1)	434 1)	533 1)	482
8	"	21	70	189	152	85	142
	"	22	81	367	241	253	287
9	K45	21	65	57	75	59	64
	"	23	84	76	102	75	84
	"	18	89	349	345	474	389
10	"	20	58	56	50	-	53
	"	22	64	63	56	-	60
11	"	21	74	544 1)	590 1)	416 1)	517
	"	22	80	1474	1340	910	1241
12	"	22	75	844 1)	778 1)	957 1)	860
	"	22	80	1363	1335	1554	1417
	"	19	89	1214 1)	1471 1)	1822 1)	1502
13	K30	21	53	23	22	28	24
	"	20	67	27	26	33	29
	"	18	97	138	178	-	158
14	"	20	57	31	31	25	29
	"	21	69	38	38	30	35
	"	21	84	40	43	32	38
15	"	20	74	138	124	161	141
	"	20	80	170	131	192	164
	"	19	90	190 1)	261 1)	235 1)	229
16	"	21	72	135	190	161	162
	"	20	82	192	239	207	213

1) Endast ett mätvärde
2) Endast två mätvärden

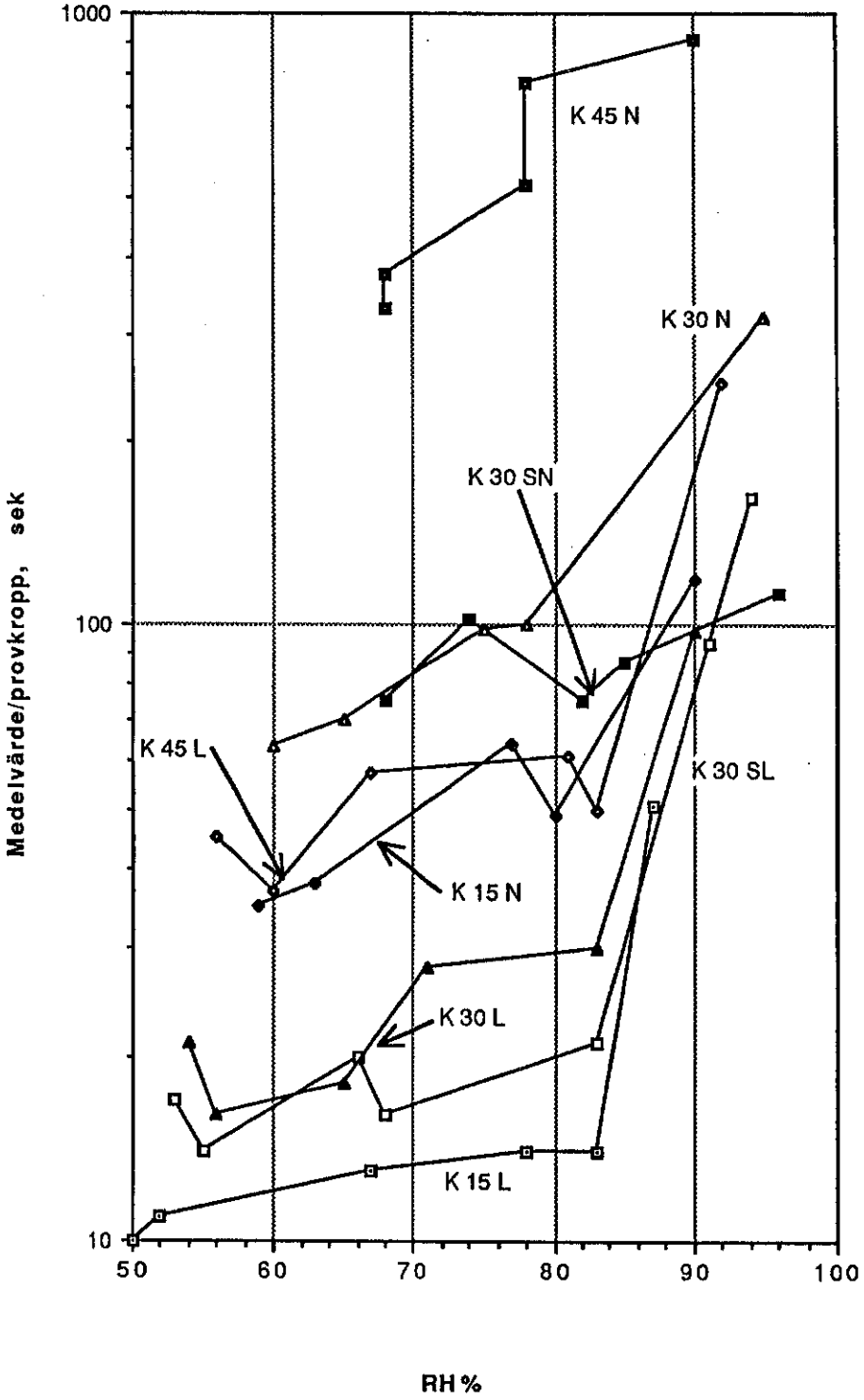


Den relativa fuktighetens inverkan
på mätvärdet (max stenstorlek 32 mm)

Resultat från mätningar enligt Figg-metoden vid varierande relativ fuktighet (RH). Primad hålvägg och maximal stenstorlek 8 mm.

Prov kropp nr	Betong-kvalitet	Temp. °C	RH %	Figg-mätning Medelvärde/hål Sek			Medelv/provkropp Sek
17	K15	20	50	10	10	11	10
	"	20	52	11	11	12	11
	"	23	78	14	15	14	14
	"	18	87	57	47	48	51
18	"	20	50	9	11	10	10
	"	22	67	12	15	13	13
	"	21	83	12	15	14	14
19	"	20	59	40	25	40	35
	"	20	77	66	56	70	64
20	"	21	63	40	42	33	38
	"	20	80	48	57	42	49
	"	19	90	126	137	95	119
21	K30	20	56	14	16	19	16
	"	21	65	16	18	20	18
	"	18	90	102	91	102	98
22	"	20	54	19	20	23	21
	"	23	71	25	27	31	28
	"	21	83	27	29	33	30
23	"	22	65	71	75	63	70
	"	22	75	102	104	90	99
	"	20	95	305	383	267	318
24	"	20	60	67	62	59	63
	"	20	78	111	99	90	100
25	K45	20	60	30	33	49	37
	"	23	83	42	42	67	50
	"	18	92	214	209	326	250
26	"	20	56	35	58	42	45
	"	22	67	44	74	53	57
	"	21	81	47	80	57	61
27	"	20	68	346 1)	398 1)	247 1)	330
	"	20	78	763	890	661	771
28	"	20	68	329	396	396	374
	"	21	78	441	493	635	523
	"	20	90	760	916	1033	903
29	K30s	21	55	14	14	13	14
	"	20	68	17	17	15	16
	"	18	91	123	102	55	93
	"	18	94	167	214	105	162
30	"	20	53	14	19	17	17
	"	21	66	16	23	20	20
	"	21	83	17	24	22	21
31	"	22	82	92	54	78	75
	"	19	85	106	63	93	87
	"	19	96	151 1)	101 1)	88 1)	113
32	"	20	68	94	50	82	75
	"	22	74	131	67	107	102

1) Endast ett mätvärde.



Den relativa fuktighetens inverkan
på mätvärdet (max stenstorlek 8 mm)

Provkropp nr	Btg.kval	Stenmax mm	Lagring	Rf %	Temp. °C	Mätvärden, medeltal av tre mätningar, s A	B	C	Tid (medel) sek.	Anmärkning
1	K 15	32	luft	57	19	12,5	15,3	14,1	14,0	
1	"	"	"	85	23	16,2	18,6	18,2	17,7	
1	"	"	"	92	18	46,2	56,5	44,7	49,1	
1	"	"	"	96	18	1637	1945	1912	1831,0	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
2	K 15	32	Luft	57	21	17,4	21,4	16,4	18,4	
2	"	"	"	69	22	21,1	26,3	19,3	22,2	
2	"	"	"	84	21	21,9	26,9	20,2	23,0	
3	K 15	32	Normal	65	22	56,0	46,9	41,5	48,1	
3	"	"	"	78	22	69,5	58,9	51,2	59,9	
3	"	"	"	87	21	74,6	64,6	-	-	Endast två hål
3	"	"	"	93	18	463,8	571,2	290,0	441,7	Tre dagar efter vattenbad
3	"	"	"	91	20	222,9	193,5	141,5	186,0	Ett värde/hål
3	"	"	"	95	19	1179,4	905,8	562,9	882,6	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
4	K 15	32	Normal	60	21	48,1	47,8	55,3	50,4	
4	"	"	"	81	22	70,2	69,4	86,5	75,4	
5	K 30	32	Luft	62	20	37,0	29,8	45,2	37,3	
5	"	"	"	69	21	41,9	32,6	51,4	42,0	
5	"	"	"	84	23	52,3	38,8	62,2	51,1	
5	"	"	"	94	19	1572	1344	1399	1438,0	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
5	"	"	"	95	18	162,5	184,6	294,3	213,8	Två värden/hål
6	K 30	32	Luft	56	20	29,3	25,3	40,6	31,7	
6	"	"	"	63	21	31,6	28,1	44,8	34,8	
6	"	"	"	71	22	-	31,2	-	-	Endast ett hål
6	"	"	"	83	21	-	32,0	-	-	"
7	K 30	32	Normal	70	23	161,9	136,1	155,9	151,3	
7	"	"	"	81	21	260,8	215,6	231,7	236,0	
7	"	"	"	92	20	478,1	434,3	533,4	481,9	Ett värde/hål
7	"	"	"	93	19	1126	1142	1959	1408,8	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål

Provkropp nr	Btg.kval	Stenmax mm	Lagring	Rf %	Temp. °C	Mätvärden, medeltal av tre mätningar, s A	B	C	Tid (medel) sek.	Anmärkning
8	K 30	32	Normal	70	21	189,1	152,4	84,9	142,1	
8	"	"	"	81	22	366,6	241,2	253,4	287,1	
9	K 45	32	Luft	65	21	56,5	74,5	58,8	63,3	
9	"	"	"	84	23	76,0	101,5	75,2	84,2	
9	"	"	"	89	18	349,4	345,2	474,4	389,7	Ett värde/hål
9	"	"	"	95	19	977,6	729,5	1013,0	906,7	Ett värde/hål
10	K 45	32	Luft	58	20	-	56,2	49,6	52,9	Hål A felaktigt
10	"	"	"	64	22	-	62,7	56,4	59,6	Hål A felaktigt
11	K 45	32	Normal	74	21	543,6	589,8	416,0	516,5	
11	"	"	"	81	22	1474	1340	910	1241,5	
12	K 45	32	Normal	76	22	844,4	777,8	956,9	859,7	Ett värde/hål
12	"	"	"	80	22	1363	1335	1554	1417,2	
12	"	"	"	89	19	1214	1470	1822	1502,3	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
13	K 30 S	32	Luft	53	21	23,0	22,3	28,1	24,5	
13	"	"	"	67	20	26,8	25,9	32,9	28,5	
13	"	"	"	96	18	271,8	-	275,1	273,4	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
13	"	"	"	97	18	137,6	-	178,3	158,0	
14	K 30 S	32	Luft	57	20	31,0	31,4	25,0	29,1	
14	"	"	"	69	21	37,6	37,8	29,7	35,0	
14	"	"	"	84	21	40,1	43,2	32,2	38,5	
15	K 30 S	32	Normal	74	20	137,9	123,8	160,6	140,8	
15	"	"	"	80	20	169,7	131,1	191,6	164,1	
15	"	"	"	85	21	172,1	-	-	-	Endast ett hål
15	"	"	"	90	19	190,0	261,0	234,8	228,6	Ett värde/hål
15	"	"	"	91	19	323,6	743,8	398,7	488,7	Dir. ur vattenbad
16	K 30 S	32	Normal	72	21	134,6	190,3	161,3	162,1	
16	"	"	"	82	20	191,9	238,6	207,0	212,5	

Provkropp nr	Btg.kval	Stenmax mm	Lagring	Rf %	Temp. °C	Mätvärden, medeltal av tre mätningar, s A	B	C	Tid (medel) sek.	Anmärkning
17	K 15	8	Luft	50	20	10,4	10,2	10,9	10,5	
17	"	"	"	52	20	11,0	11,1	11,5	11,2	
17	"	"	"	78	23	13,9	14,5	14,3	14,2	
17	"	"	"	87	18	57,3	47,4	47,5	50,7	
17	"	"	"	97	18	1875	-	1998	1936,0	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
18	K 15	8	Luft	50	20	8,9	11,3	10,1	10,1	
18	"	"	"	67	22	11,5	14,8	13,3	13,2	
18	"	"	"	83	21	12,0	15,2	13,5	13,6	
19	K 15	8	Normal	59	20	40,1	25,0	40,0	35,0	
19	"	"	"	77	20	65,8	55,6	70,0	63,8	
20	K 15	8	Normal	63	21	39,8	42,4	32,6	38,3	
20	"	"	"	80	20	-	56,9	-	-	Endast ett hål
20	"	"	"	90	19	126,1	137,3	94,9	119,4	
20	"	"	"	91	18	1052	1392	1179	1207,7	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
21	K 30	8	Luft	56	20	14,2	16,3	18,5	16,3	
21	"	"	"	64	21	16,3	17,8	19,7	17,9	
21	"	"	"	90	18	101,8	91,0	102,4	98,4	
21	"	"	"	95	18	1991	1816	1835	1881,0	Dir. ur vattenbad
22	K 30	8	Luft	54	20	18,9	20,0	23,0	20,6	
22	"	"	"	71	23	24,9	27,3	31,3	27,8	
22	"	"	"	83	21	26,6	28,7	33,0	29,4	
23	K 30	8	Normal	65	22	70,5	75,0	62,7	69,4	
23	"	"	"	75	22	102,3	103,8	90,4	98,8	
23	"	"	"	91	18	1973	2461	2090	2175,0	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
23	"	"	"	95	20	305,0	383,3	266,8	318,4	Ett värde/hål
24	K 30	8	Normal	60	20	67,4	62,2	59,3	63,0	
24	"	"	"	78	20	110,6	98,5	90,3	99,8	

Provkropp nr	Btg.kval	Stenmax mm	Lagring	Rf %	Temp. °C	Mätvärden, medeltal av tre mätningar, s A	B	C	Tid (medel) sek.	Anmärkning
25	K 45	8	Luft	60	20	30,4	33,3	49,3	37,7	
25	"	"	"	83	23	42,1	42,2	67,3	50,5	
25	"	"	"	92	18	213,7	208,5	325,8	249,3	
25	"	"	"	93	19	1543	-	1315	1429,0	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
26	K 45	8	Luft	56	20	34,5	58,0	42,4	45,0	
26	"	"	"	67	22	43,9	74,2	52,8	57,0	
26	"	"	"	81	21	47,4	79,8	56,9	61,4	
27	K 45	8	Normal	68	20	345,5	398,3	247,2	330,3	Ett värde/hål
27	"	"	"	78	20	762,6	889,8	661,3	771,2	
28	K 45	8	Normal	68	20	329,4	396,0	396,1	373,8	
28	"	"	"	92	19	705,6	906,0	893,0	834,9	Dir. ur vattenbad, ett värde/hål
28	"	"	"	90	20	760,4	915,5	1032,8	902,9	Ett värde/hål
29	K 30 S	8	Luft	55	21	14,3	14,2	12,9	13,8	
29	"	"	"	68	20	17,3	17,0	15,3	16,5	
29	"	"	"	91	18	123,4	102,1	54,7	93,4	
29	"	"	"	94	18	165,8	343,0	211,0	239,9	Dir. ur vattenbad
29	"	"	"	94	18	166,8	215,0	104,8	162,2	
30	K 30 S	8	Luft	53	20	14,1	18,9	17,3	16,8	
30	"	"	"	66	21	15,9	22,6	20,0	19,5	
30	"	"	"	83	21	17,0	24,3	21,5	20,9	
31	K 30 S	8	Normal	82	22	91,5	53,6	77,6	74,2	
31	"	"	"	85	19	106,1	62,7	92,5	87,1	
31	"	"	"	90	18	303,7	233,4	179,3	238,8	Dir. ur vattenbad
31	"	"	"	96	19	150,9	100,8	88,0	113,2	Ett värde/hål
32	K 30 S	8	Normal	69	20	93,8	50,3	82,3	75,5	Två värden/hål
32	"	"	"	74	22	131,3	67,4	107,3	102,0	

CEMENT OCH BETONG INSTITUTET
Uppdragsfunktionen

Nr 88053
88-07-08
KE/ACN

SYRGASDIFFUSIONSMÄTNING PÅ BETONGPROVER

1 ORIENTERING

På uppdrag av Statens Provningsanstalt har Cement och Betong Institutet, CBI, utfört syrgasdiffusionsmätningar på 17 inlämnade betongprover.

De undersökta proverna har lagrats vid 20°C och 50 % RF under 6 månader så att mätningarna representerar betong som kan antas ha nått maximal hydratationsgrad.

2 PROVNINGSMETOD

Mätutrustningen består av en diffusionscell, kopplad till en tub med högren kvävgas och en tub med luft, en manometer och en syrgasanalysator. Se Fig 1

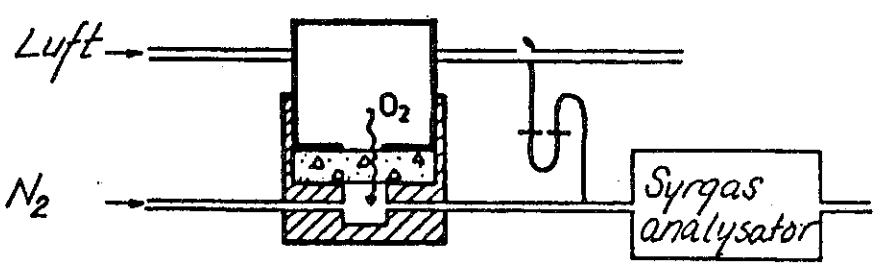


Fig 1. Metod för mätning av diffusion genom betong.

Undersökningen utfördes med 0,005 MPa övertryck i både luft- och kvävgas-utrymmet för att undvika läckage och felkällor.

Syrgasanalysatorn består bl a av ett zirkoniumrör där gasen passerar och analyseras. Analysatorns noggrannhet är 0,01 ppm O_2.

3 ANALYSRESULTAT

Det uppmätta syrgasflödet genom de olika betongproverna har omräknats till effektiv diffusionskoefficient enligt Fick's ekvation:

$$J = A \cdot D_{eff} \cdot \frac{dc}{dx}$$

där: J = O_2- flöde per tidsenhet

A = flödesarea

D_{eff} = effektiv diffusionskoefficient

$\frac{dc}{dx}$ = koncentrationsgradient

TABELL 1

Prov nr:	$D_{eff} \cdot 10^{-8}$ m^2s^{-1}
2	3,13
4	2,84
6	2,25
8	2,15
10	2,25
11	1,01
12	0,77
14	2,31
16	1,06
18	6,33
20	1,93
22	6,63
24	2,73
26	3,08
28	1,60
30	4,49
32	2,17

Som jämförelse kan nämnas resultat enligt Tutti (CBI fo 4.82), se Fig 2.

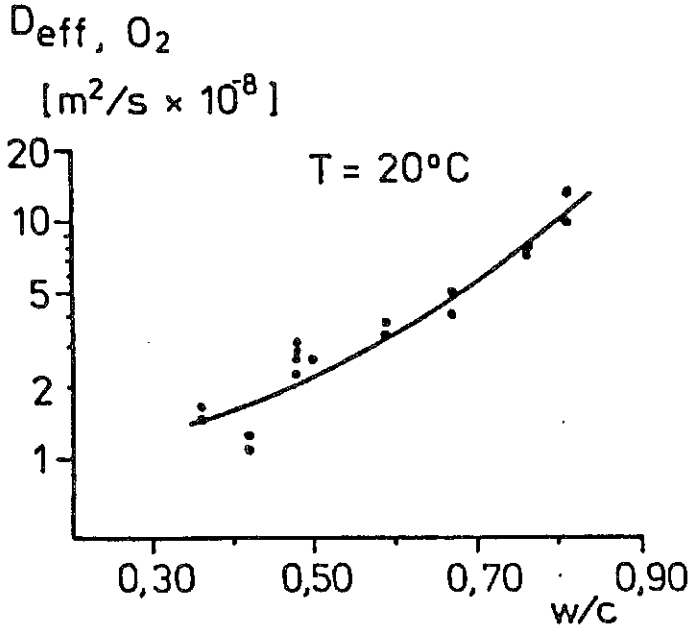


Fig 2. Effektiv diffusionskoeffcient för O_2 som funktion av vct. Cementtypen var Slite Portland cement. Mätningen utfördes vid 20°C och 50% RF. Proverna var ungefär 1 år gamla.

Stockholm den 8 juli 1988

CEMENT OCH BETONG INSTITUTET
Uppdragsfunktionen

Karin Ericsson

Karin Ericsson

Vidi: Göran Möller

Göran Möller

VASASTADENS BOKBINDERI AB
1989