

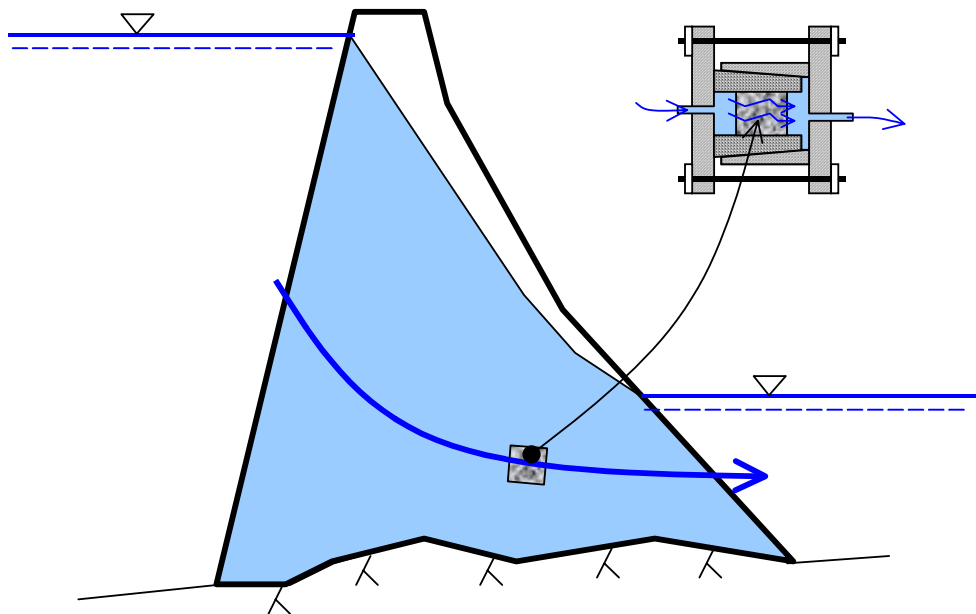


norden

Nordic Innovation Centre

NT TECHNICAL REPORT

METOD FÖR BESTÄMNING AV VATTENPERMEABILITETEN HOS BETONG



Tomas Ekström & Guðni Jónsson

Authors: Tomas Ekström ¹⁾ Guðni Jónsson ²⁾		Nordic Innovation Centre project number: 04012	
		Institution: ¹⁾ Carl Bro AB, ²⁾ The Icelandic Building Research Institute	
Title: Metod för bestämning av vattenpermeabiliteten hos betong			
Abstract: <p>Vattenpermeabilitet är i många fall avgörande för beständighet och livslängd hos porösa material som t.ex. betong. Det finns idag ingen standardiserad metod för bestämning av Darciansk permeabilitet.</p> <p>Den metod som presenteras här är enkel och sätts samman huvudsakligen av standardkomponenter. Den klarar av både gjutna koniska såväl som utborrade cylindriska provkroppar. Använt tryck har maximalt varit 7.8 respektive 16 bar (en utrustning i Sverige och en på Island). Använd tryckgradient har med 50 mm långa provkroppar varit maximalt 1560 m/m respektive 3200 m/m. Repeterbarheten av mätningar i samma laboratorium har varit god i projektet. Reproducerbarheten har mätts i ett "Round-Robin"-test mellan Island och Sverige. Den var tyvärr inte fullt så god. Det bör utföras fler sådana tester för att utröna om det bara var en engångsföreteelse.</p> <p>En kritisk faktor vid Darciansk permeabilitet är om provkroppen är vattenmättad vid start. I projektet föreslås att provkroppar som inte uppenbarligen är vattenmättade vakuumbehandlas. Med vakuumbehandling menas att provkroppen läggs i en behållare varefter en pump suger ut luften ur behållaren och ur provkroppen. Efter ett dygn så släpps vatten in i behållaren under vakuum. Vattnet ska då fullständigt mäta provkroppen. Upphetning eller torkning i ugn innan vakuumbehandlingen ska undvikas därför att det förstör provkroppens porstruktur.</p> <p>Det kan vara svårt att mäta Darciansk permeabilitet med betong med lågt vct-tal eller ung betong på grund av att man kan få en fortsatt hydrataion när vatten börjar sippra igenom betongen vid försökets start. Luft kan då bildas i porsystemet, vatten kan konsumeras till hydrataion samt betongen blir tätare under försökets gång, vilket medför att flödet inte blir Darcianskt.</p>			
Technical Group: Building			
ISSN: 0283-7234	Language: Swedish	Pages: 28 p. + 1 appendix	
Key Words: Water permeability, concrete, test method.			
Distributed by: Nordic Innovation Centre Stensberggata 25 N-0170 Oslo Norway		Report Internet address: www.nordicinnovation.net	

Förord

Denna rapport har skrivits i samband med ett Nordisk InnovationsCenter-projekt (Nordtestprojekt) som pågick åren 2003 och 2004. I detta projekt har även skrivits ett förslag på en Nordtestmetod.

Projektet har finansierats av Nordisk Innovations Center, Elforsk, Carl Bro AB och IBRI.

Utrustning till vattenpermeabilitetsprovningar på Island har finansierats av RANNÍS, Vegagerðin och Landsvirkjun

Malmö och Reykjavik januari 2005.

Tomas Ekström
Carl Bro AB

Guðni Jónsson
The Icelandic Building Research Institute

Sammanfattning

Vattenpermeabilitet är i många fall avgörande för beständighet och livslängd hos porösa material som t.ex. betong. Det finns idag ingen standardiserad metod för bestämning av Darciansk permeabilitet.

Den metod som presenteras här är enkel och sätts samman huvudsakligen av standardkomponenter. Den klarar av både gjutna koniska såväl som utborrade cylindriska provkroppar. Använt tryck har maximalt varit 7.8 respektive 16 bar (en utrustning i Sverige och en på Island). Använd tryckgradient har med 50 mm långa provkroppar varit maximalt 1560 m/m respektive 3200 m/m. Repeterbarheten av mätningar i samma laboratorium har varit god i projektet. Reproducerbarheten har mätts i ett "Round-Robin"-test mellan Island och Sverige. Den var tyvärr inte fullt så god. Det bör utföras fler sådana tester för att utröna om det bara var en engångsföreteelse.

En kritisk faktor vid Darciansk permeabilitet är om provkroppen är vattenmättad vid start. I projektet föreslås att provkroppar som inte uppenbarligen är vattenmättade vakuumbehandlas. Med vakuumbehandling menas att provkroppen läggs i en behållare varefter en pump suger ut luften ur behållaren och ur provkroppen. Efter ett dygn så släpps vatten in i behållaren under vakuum. Vattnet ska då fullständigt mätta provkroppen. Upphetning eller torkning i ugn innan vakuumbehandlingen ska undvikas därför att det förstör provkroppens porstruktur.

Det kan vara svårt att mäta Darciansk permeabilitet med betong med lågt vct-tal eller ung betong på grund av att man kan få en fortsatt hydrataion när vatten börjar sippra igenom betongen vid försökets start. Luft kan då bildas i porsystemet, vatten kan konsumeras till hydrataion samt betongen blir tätare under försökets gång, vilket medför att flödet inte blir Darcianskt.

Summary

Water permeability is often crucial for the durability and service life of porous material as for example concrete. Today, there is no standard method for determination of Darcian permeability.

The method presented is simple and consist mainly of standard parts. It can be used both with conical as with out-drilled cylindrical specimens. The pressure used in the project has been as maximal 7.8 bar and 16 bar for the equipment in Sweden respective on Iceland. The pressure gradient has been as maximal 1560 m/m and 3200 m/m respectively. The repeatability for the test has been good. The reproducibility has been investigated by a Round-Robin test on Iceland and in Sweden. Unfortunately the result was not so good. It is proposed that more Round-Robin tests shall be performed to see if it was only an isolated case.

A critical factor for Darcian permeability is whether the specimen is saturated with water or not. We propos that specimens that obviously not are saturated is saturated with vacuum treatment followed by water absorption. The specimen shall not be heated or dried in oven before the vacuum treatment to avoid destroying the specimens pore structure.

If the concrete has a low wc-ratio there is a risk that air is developed inside the concrete, that water is consumed and that the concrete becomes tighter during the test, which lead to that the flow becomes non-Darcian.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	MÅL	1
1.3	AVGRÄNSNINGAR	2
2	UTVÄRDERING AV EXISTERANDE METODER	3
2.1	ALLMÄNT	3
2.2	DARCIANSK PERMEABILITET	4
2.3	TESTCELL	5
2.4	TRYCKSIDA	6
2.5	MÄTNING AV VATTENFLÖDE	6
3	AKTUELL UTRUSTNING	9
3.1	VAL AV UTRUSTNING	9
3.2	BESKRIVNING AV VALD UTRUSTNING	9
4	TEST METOD	12
5	GILTIGHET	13
6	PÅLITLIGHET OCH FELKÄLLOR	14
7	REDOVISNING AV RESULTAT	15
8	EXEMPEL PÅ PROVNINGAR MED UTRUSTNINGEN	16
8.1	DOKTORANDPROJEKT 1997 – 2003 PÅ LTH	16
8.2	PROVNING AV BETONG I SLUSSVÄGG	16
8.3	VATTENMÄTTNADSTEST	20
8.4	ROUND-ROBIN TEST	23
8.5	PROV MED RELATIVT TÄT BETONG MED CEMENT MALT MED SILIKA	25
9	SLUTSATSER	27
10	REFERENSER	28

BILAGA A Föreslagen ny Nordtestmetod

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Det finns en mängd olika existerande betongkonstruktioner som är utsatta för ensidigt vattentryck, t.ex. dammar, tunnlar, stödmurar, kajer, kylvattenvägar, färskvattencisterner, simbassänger, off-shore anläggningar, kanaler, slussar, o.s.v. Vattenpermeabiliteten är i många fall avgörande för beständigheten och livslängden för sådana konstruktioner. Tillförsel av aggressiva ämnen eller joner, urlakning av cementpasta, inverkan vid frysning styrs alla till stor del av vattenpermeabiliteten.

Det finns, enligt vår kännedom, ingen standardmetod för att mäta vattenpermeabiliteten hos utborrade betongprov. Med vattenpermeabilitet menas här Darciansk ("steady-state") permeabilitet med homogent genomsippande vatten. Det finns många utrustningar som använts genom åren för att mäta den Darcianska permeabiliteten i forsknings- och utvecklingsprojekt, men det finns ingen standardiserad metod. Det finns en svensk standardmetod (SS 13 72 14) och en metod utarbetad av Rilem (CPS 13.2) för att mäta hur långt vatten penetrerar in i betong efter ett antal dygn. Baserat på gamla försök antas där inträngningsdjupet motsvara en viss "verklig" permeabilitet.

En fördel med att mäta verklig "Darciansk" permeabilitet är t.ex. att förändringar i tiden på grund av olika mekanismer kan studeras. En utrustning som mäter den Darcianska permeabiliteten under en längre tid kan användas för att studera nedbrytningsskador såsom framförallt urlakning men troligen kan även andra skadetyper såsom t.ex. frysning, kloridinträngning och alkali-kisel reaktioner studeras.

En metod att mäta den Darcianska vattenpermeabiliteten kan användas t.ex. för att verifiera ställda krav i byggskedet eller vid bedömning av tillstånd och kvarvarande livslängd hos existerande konstruktioner.

Under åren 1997-2002 har ett doktorandprojekt angående urlakning av betong bedrivits och avslutats (Ekström 2003). I detta projekt utvecklades en utrustning för att mäta Darciansk vattenpermeabilitet. Dock saknades möjligheten att prova utborrade kärnor.

1.2 Mål

Målsättningen är att utvärdera och vidareutveckla några existerande metoder för att mäta den Darcianska (steady-state) vattenpermeabiliteten hos betong (utborrade cylindrar eller gjutna koniska cylindrar). Resultatet ska användas för utarbetande av en Nordtestmetod.

Andra mål är att metoden ska utformas så att inverkan av aggressivt vatten på lång sikt ska kunna observeras. Provningsen ska kunna avbrytas och återupptas igen.

1.3 Avgränsningar

Med, i projektet använda, testceller kan provkroppar av följande storlekar provas:

- Koniska provkroppar gjutna i stålcellerna: $\phi 150\text{mm}$ och $\phi 45\text{ mm}$ samt en längd på $\leq 90\text{ mm}$.
- Cylindriska, utborrade provkroppar: $\phi \leq 120\text{mm}$ och längd $\leq 90\text{ mm}$.

2 Utvärdering av existerande metoder

2.1 Allmänt

Variationen i permeabilitet hos betong för genomströmmande vatten brukar vara stor, större än variationen hos någon annan egenskap hos betongen. Eftersom man förenklat kan säga att vattenflödet genom en porös kropp är proportionell mot flödeskanalers diameter upphöjt till 4, så förstås att mängden porer, hur stora de är och hur sammanhängande de är styr flödet. Det är framförallt skillnader i sammansättningen hos betongen, ålder hos betongen och härdningssätt samt hur själva testproceduren för vattengenomsläppligheten ser ut som ger den stora variationen (Hooton 1989). De viktigaste faktorerna som styr permeabiliteten är:

- Är betongen ung (låg hydratationsgrad) kan man få en fortsatt hydratation under permeabilitetstestet, vilket minskar vattengenomsläppligheten.
- Pågår permeabilitetstestet under en längre tid kan man få en urlakning av cementpasta eller lösliga föreningar i ballasten, vilket kan öka vattengenomsläppligheten.
- Är inte betongen vattenmättad vid starten av permeabilitetstestet blir vattengenomsläppligheten lägre än vid ett vattenmättat prov.
- Torkas eller hettas betongen upp ökar vattengenomsläppligheten mycket jämfört med jungfrulig betong.
- Innehåller det inflödande vattnet vissa salter eller löst koldioxid kan detta reagera med betongen så att permeabiliteten förändras, minskar i vissa fall och ökar i vissa fall.
- Ligger nedströmssidan av betongprovet i luft så kan den delen torka och reagera med luftens koldioxid så att permeabiliteten där förändras (ofta minskas).
- Vid lågt vct-tal kan provkroppen torka ut i mitten trots att den ligger i vattenbad på grund av kemisk uttorkning under hydratationen.

Vattenpermeabiliteten mäts oftast i en utrustning bestående av huvuddelarna:

- En trycksida som skapar en vattentryck mot uppströmssidan av provkroppen.
- En testcell vari provkroppen är placerad
- En mätanordning vid nedströmssidan av provkroppen som mäter vattenflödet.

Man kan säga att de testmetoder av vattenpermeabiliteten som använts genom åren inte har varit vare sig standardiserade eller så värst lika varandra. De aspekter som troligen haft störst inverkan på resultatet har varit:

- Betongrecepten har varit olika.
- Härdningssättet har varit olika (uttorkning, uppvärmning, i luft, ånga eller vatten, etc.)
- Inflödande vattenkvaliteten har varit olika.

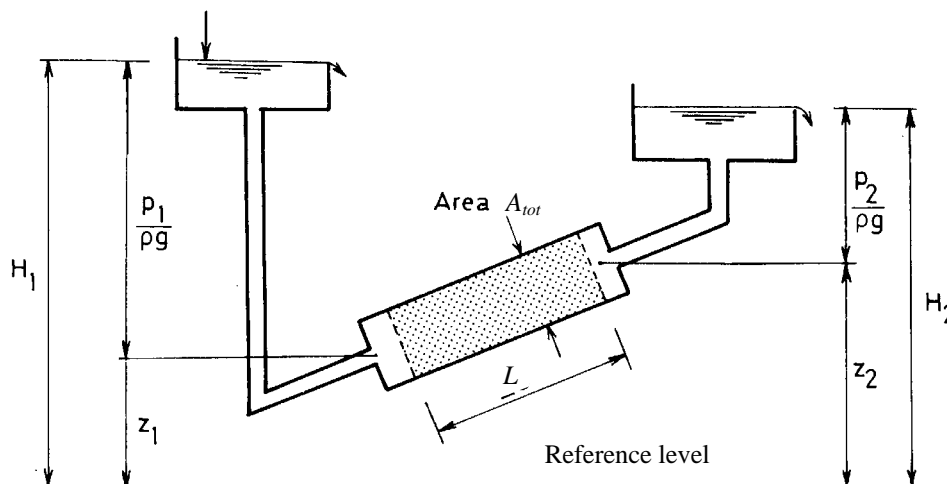
- Permeabiliteten har mätts vid olika tidpunkter eller provningen har pågått olika lång tid (permeabiliteten förändras oftast med tiden).
- Olika ålder av betong vid uppstarten av permeabilitetstestet har använts.
- Olika vattentryck under pågående permeabilitetstest har använts.
- Största stenstorlek har varierat.
- Provkroppsstorlek och tillverkning av provkropp, t.ex. gjuten eller utborrad har varierat.

En stor nackdel med att ej standardiserade mätmetoder har använts är att resultaten från den stora mängd undersökningar som finns från de sista hundra åren är svåra att jämföra med varandra.

2.2 Darciansk permeabilitet

Med vattenpermeabilitet menas *Darciansk* (steady-state) permeabilitet med homogent, kontinuerligt, genomsippande vatten. Darcy (1856) fann följande relation när han lät vatten flöda genom en cirkulär tub fylld med sand (jämför Figur 2.1):

$$q_w = -k_w \cdot A_{tot} \cdot \frac{(H_1 - H_2)}{L} \quad (2.1)$$



Figur 2.1 En principfigur för Darcy's experiment (Cederwall och Larsen 1976)

Vattenflöde genom betong och cementpasta brukar vanligtvis uppskattas med Darcy's ekvation (Ruettgers 1935, Powers et al 1958). Avvikelse från Darcianskt flöde fås i betong framförallt vid de faktorer som räknats upp i sektion 2.1 och som kan medföra:

- Porsystemet inte är komplett fyllt med vatten.
- Porstrukturen förändras med tiden (genom t.ex. fortsatt hydratation eller urlakning).

Dessutom kan följande inverka:

- Intermolekulära ytkrafter i små porer.
- Viskositeten hos vatten förändras med temperaturen. Darcy's lag förutsätter isothermiska förhållanden.

2.3 Testcell

En testcell består vanligtvis av en stålcylander som innesluter en provkropp. Någon slags tätning brukar användas mot oönskade läckage mellan provkropp och stålcylander. Testceller indelas vanligen i två kategorier (Hearn 1992): *triaxiella* eller *enaxiella*.

I **triaxiella** celler används två tryck, ett tryck som trycker mot ett tätt membran som omger provkroppen och ett annat tryck används för att trycka vattnet igenom provkroppen (se Figur 2.2). De anses ha följande fördelar (Hearn 1992):

- Tätningen mellan provkropp och membranet fungerar vanligtvis bra.
- Provkroppar med varierande tjocklekar och diametrar kan användas.

De anses dock ha en del nackdelar:

- Rördragningen vid tillverkningen av cellen är komplex.
- Två separata tryck måste användas.
- Det omgivande trycket anses påverka permeabiliteten.

I **enaxiella** celler används ett tryck som trycker vattnet mot provkroppens ena ände och därigenom trycks vattnet igenom provkroppen (se Figur 2.3). Den kritiska aspekten är att få tätt mot vattenläckage runt provkroppens mantelyta. Tätningen sker ofta enligt två olika principer: *passiv* eller *aktiv* tätning. Den passiva tätningen består av att tomrummet mellan provkroppen och stålcyldern fylls med t.ex. asfalt eller epoxi som får stelna.

Den **passiva** tätningen anses ha en del nackdelar (Hearn 1992):

- Det tar extra tid att preparera provkroppen i cellen.
- De flesta tätningsmaterialen förutsätter en torr provkroppsyta, dvs provkroppen måste torka litet vilket kan "förstöra" porstrukturen och påverka permeabiliteten.
- Tätningen beror på skjuvhållfastheten hos tätningen mot provkroppen vilket begränsar hur stort tryck som kan användas.

Den **aktiva** tätningen beror på att ett tryck aktiverar tätningen. Några exempel är:

- Det externa trycket runtom provkroppens tätningsmembran i triaxialcellen.
- Lawrence's cell som använder en gummislang runt provkroppen. Slangen fylls med luft under tryck och tätar därigenom mot provkroppen.
- Provkroppen och cylindern som den sätts i är koniska (t.ex. Powers 1958 och Ekström (2003). Vid applicerat tryck mot ena kortändan på provkroppen pressas provkroppen nedåt och utåt mot cylindern och självtätar därmed. Mellan provkropp och stålcylander sitter ett tätningsmembran. En nackdel är att endast koniskt gjutna provkroppar kan användas. Utborrade kärnor med denna metod kan ej användas. Det är därför svårare att mäta permeabilitet hos "bulkbetong" eller utborrade kärnor från existerande betongkonstruktioner.
- Ett skikt av vulkaniserat silikongummi gjuts mellan provkroppen och stålcyldern. När ändplattorna av stål skruvas till stålcyldern pressas skiktet ihop och expanderar in mot provkroppen och tätar därmed (t.ex. Mills 1986, Hearn 1992).

2.4 Trycksida

Olika tekniker har använts genom åren för att skapa ett vattentryck mot uppströmssidan på provkroppen. De vanligaste har varit:

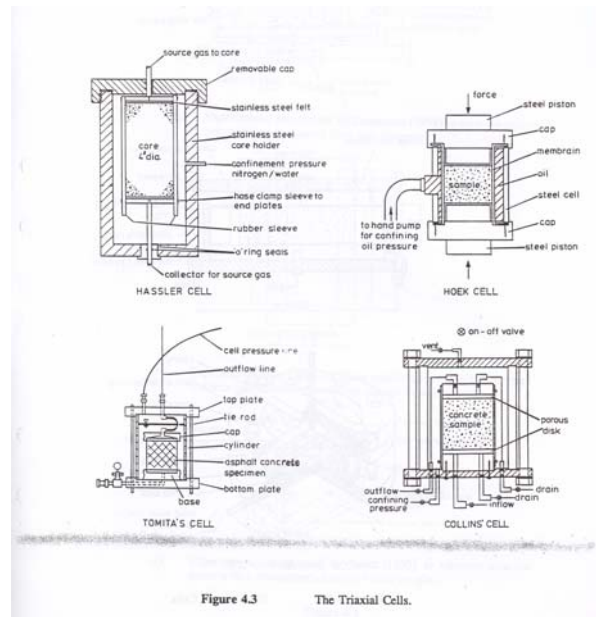
- Cellerna har satts i anslutning till en verklig anläggning, t.ex. i en vattenkraftstation och trycksatt vatten har letts direkt från den uppströms belägna vattenreservoaren.
- En gasflaska har utövat ett tryck på en vattenyta i ett kärl och detta vatten har då trycksatts.
- En pump har tryckt in vatten i en ackumulator (hydrofor) och vatten har sedan under tryck släppts ut från ackumulatorn.
- En viktbelastad hävstång har genom en hydraulisk kolv trycksatt vattnet (Figur 2.4).

2.5 Mätning av vattenflöde

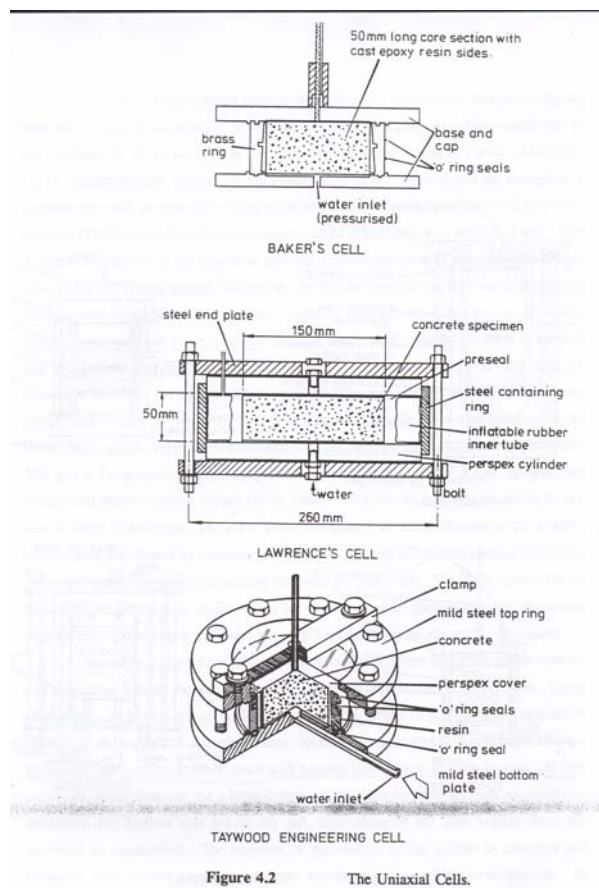
Olika typer av metoder för mätning av vattenflöde har använts genom åren:

- Vatten som kommer ut på nedströmssidan mäts till sin volym i ett kärl (byrett, mätglas).
- Vatten som kommer ut på nedströmssidan mäts till sin vikt.
- (Mills 1986, Hearn 1992) Vid trycksida av hävstångstyp mäter en LVDT-givare hur mycket hävstången trycker ihop den hydrauliska kolven, vilket ger hur stor vattenvolym som pressas in i provkroppen. På nedströmssidan trycks en pistong uppåt av utströmmande vatten gör så att en LVDT-givare rör sig uppåt och därmed mäter utströmmande vattenvolym.

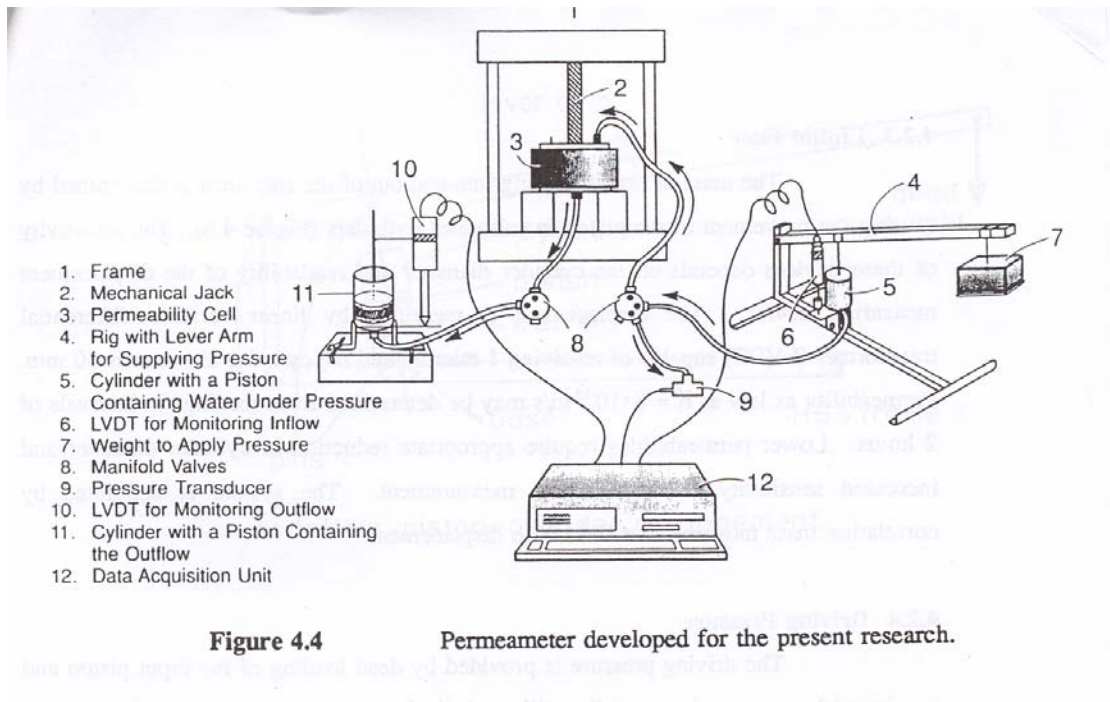
De två första typerna ovan har använts sedan början av 1900-talet.



Figur 2.2 Exempel på triaxiella celler från litteraturen (Hearn 1992)



Figur 2.3 Exempel på enaxiella celler från litteraturen (Hearn 1992)



Figur 2.4 Eksempel på komplett permeabilitetsutrustning (Hearn 1992)

3 Aktuell utrustning

3.1 Val av utrustning

Två utrustningar av samma typ har använts i projektet, en placerad i Sverige på avdelningen för Byggnadsmaterial på Lunds Tekniska Högskola och en placerad på Island på ” The Icelandic Building Research Institute”, se Figur 3.1.

Den typ av utrustning som använts för detta projekt och som beskrivs nedan valdes därför att:

- Den är byggd av standardkomponenter, vilket förenklar och förbilligar utrustningen.
- Ett stort antal testceller kan anslutas till samma trycksida.
- På ett enkelt sätt kan olika tryck användas samtidigt för olika celler.
- Både betong med hög permeabilitet och med låg permeabilitet, dvs både höga såväl som låga flöden, kan testas.

3.2 Beskrivning av vald utrustning

Utrustningen i Sverige var redan befintlig vid projektstarten. Den byggdes år 1997 för ett doktorandprojekt om urlakning i betong (se Ekström 2003).

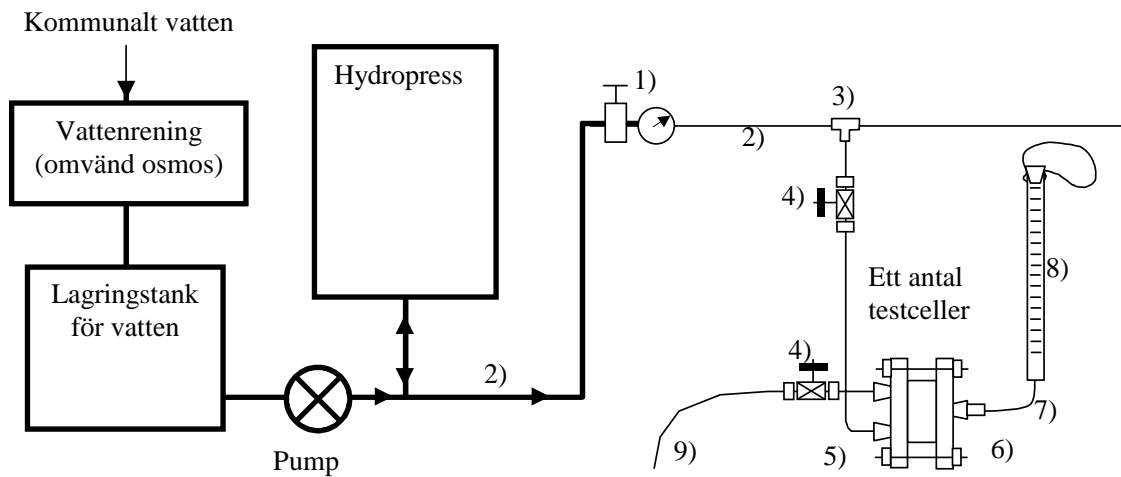
Utrustningen på Island har byggts under år 2003 och består huvudsakligen av tre delar:

1. Trycksida bestående av vattenrening, pump, hydrofor och tryckreduceringsventiler (Figur 3.2).
2. Diverse plaströr, ventiler och andra rördetaljer.
3. 6 st stålceller som skall innehålla provkropparna under permeabilitetstesterna.

Utrustningen har tillverkats i Sverige och har levererats till Island där den har monterats och anpassats.

Utrustningarna kan användas vid ett tryck på maximalt ca 7.5 (Sverige) respektive 16 bar (Island). Den har i det aktuella projektet kompletterats med koniska plastpluggar för att kunna prova utborrade betongcylindrar.

I utrustningen kan både koniskt gjutna provkroppar såväl som utborrade kärnor provas, se Figur 3.3.



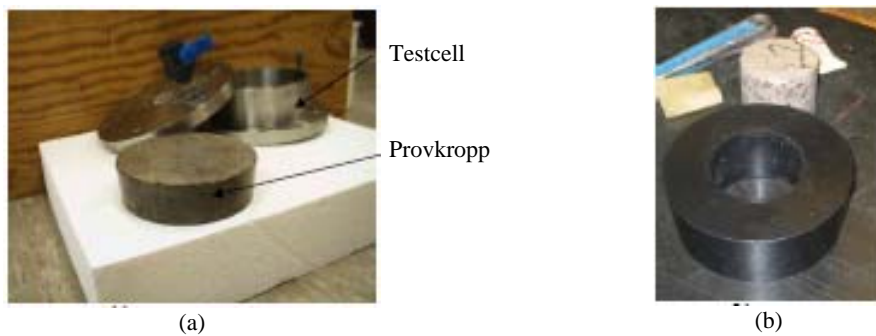
- 1) Tryckreduceringsventil + manometer.
- 2) Tub av plast eller stål.
- 3) Tubgren.
- 4) Avstängningsventil.
- 5) Tubanslutning till cell.
- 6) Anslutning cell-mätanordning.
- 7) mjuk slang.
- 9) Slang för luftning av uppströmsidan.

- 2) Tub av plast eller stål.
- 4) Avstängningsventil.
- 6) Anslutning cell-mätanordning.
- 8) mätglass + plugg + ballong.

Figur 3.1 Principfigur för använd utrustning.



Figur 3.2 Foto på den utrustningen på Island. Den innehåller vattenrening, pump, hydrofor och tryckreduceringsventiler.



Figur 3.3 (a) En testcell med alternativet en gjuten, konisk betongprovkropp. (b) Alternativet med en utborrad betongkärna som placeras i en plastplugg som trycks ner i testcellen i (a).

I den aktuella utrustningen kan betongprovkroppar med mått enligt Tabell 3-1 testas.

Tabell 3-1 Möjliga mått på provkropparna.

	Koniska provkroppar gjutna i stålcellerna		Cylindriska, utborrade provkroppar	
	Diameter (mm)	Tjocklek (mm)	Diameter (mm)	Tjocklek (mm)
Sverige	150	≤50	100	≤50
Island	150	≤90	100	≤90

4 Test metod

Se beskrivning i BILAGA A.

5 Giltighet

Se BILAGA A.

6 Pålitlighet och felkällor

Se BILAGA A.

7 Redovisning av resultat

Se BILAGA A.

8 Exempel på provningar med utrustningen

Doktorandprojekt 1997 – 2003 på LTH
Se Ekström (2003).

8.1 Provning av betong i slussvägg

8.1.1 Allmänt

I ett projekt åt Sjöfartsverket provades betong från en sluss. Provingen ägde rum på avdelningen för Byggnadsmaterial och Växtekologen på Lunds universitet. 3 st borrkärnor med diametern $\phi 104$ mm borrades i november år 2003 i torrhet ut i horisontell riktning i en slussvägg i en sluss. Väggen är av betong. Kärnorna togs från nivåerna:

- Borrkärna 1: $h = 1.5$ m över slusströskelns överkant.
- Borrkärna 2: $h = 4.5$ m över dito.
- Borrkärna 3: $h = 7.5$ m över dito.

Tröskelns överkant befinner sig ca 15 m under uppströms vattenyta och ca 7 m under nedströms vattenyta. Följande egenskaper provades i betongkärnorna:

- Vattenpermeabilitet
- Spräckhållfasthet
- Densitet
- Porositet
- Urlakningsgrad med hjälp av en kemisk analys

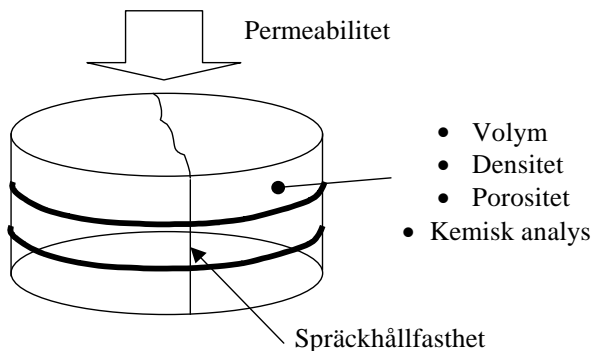
De olika borrkärnorna kapades i ett antal cylindrar, se Figur 8.1. Ett litet x är inprickat i figuren för de egenskaper som provades.

Borrkärna 1																	Diameter
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	104
Tjocklek	43	49	49	49	50	50	50	50	50	50	50	50	50	100	50	50	mm
Permeabilitet			x		x								x				
Spräckprov	x	x		x		x	x	x				x		x			
Porositet	x	x				x								x			
Kem prov	x	x				x								x			

Borrkärna 2																		Diameter	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	104
Tjocklek	47	50	50	50	50	50	50	49	50	50	50	50	50	100	50			mm	
Permeabilitet			x			x													
Spräckprov	x	x	x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x	
Porositet	x	x	x																
Kem prov	x	x	x																

Borrkärna 3														Diameter		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	104	
Tjocklek		45	50	49	49	48	48	50	50	51	100	100	49	99	100	mm
Permeabilitet										x						
Spräckprov			x	x		x		x		x		x		x		x
Porositet																
Kem prov																

Figur 8.1 Beskrivning av de tre olika borrkärnorna. Ände längst till vänster har vett mot vattnet i slussen. Varje borrkärna kapades i ett antal mindre cylindrar. Vid varje sågsknitt försvann ca 4 mm av materialet. Tjocklek och diameter på respektive cylinder visas liksom vilka provningar de utsattes för. Beteckningen "Porositet" inbegriper mätning av totalporositet, volym och densitet.



Figur 8.2 Provningar på cylindrarna. Först testades vattenpermeabiliteten (för en del cylindrar). Därefter spräcktes cylindern för att erhålla spräckhållfastheten. Senare sågade vissa cylindrar i skivor, skivorna vägdes över och under vatten samt efter torkning i ugn. Slutligen maldes skivorna till pulver och löstes upp i salpetersyra och kvarvarande element mättes i lösningen.

8.1.2 Vattenpermeabilitet

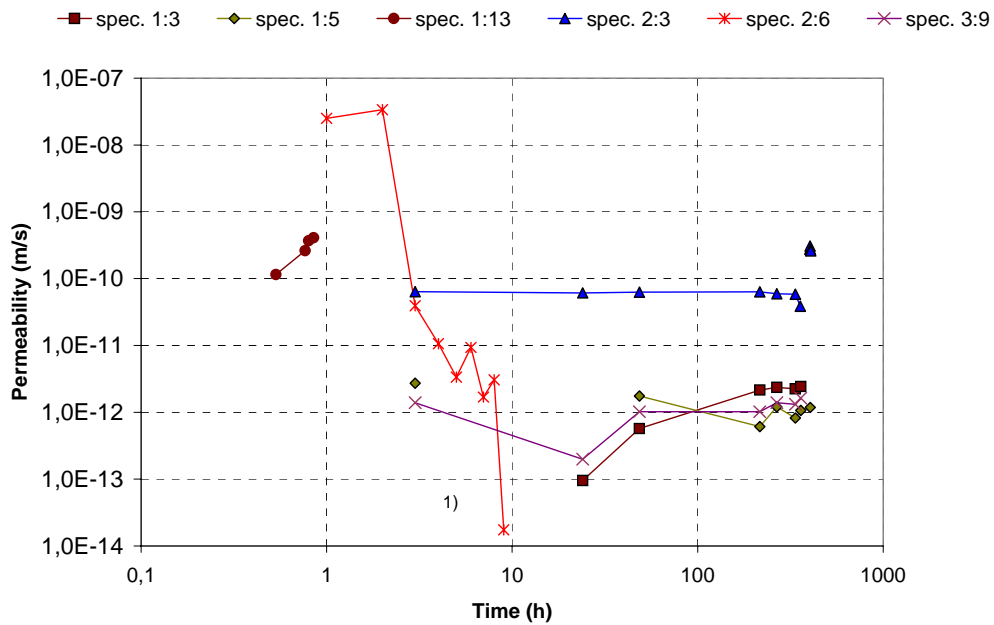
Permeabiliteten provades på några av cylindrarna från borrhärnorna, se Figur 8.3 och Figur 8.4. För att testa att vattnet verkligen flödade genom betongprovkroppen enbart och inte via randen mellan provkropp och stålcylder, så sattes vid ett tillfälle en tät ballong på uppströmssidan av provkropp 2:6 (cylinder 6 från borrhärna 2). Vattenflödet avtog då helt och hållet, vilket bör innebära att uppmätt vattenflöde härrör sig enbart från vatten som går igenom provkropparna. I tillägg till denna kontroll så avbröts försöken, provkropparna monterades om igen och när vattenpressningen återupptogs så var alltid vattenflöde lika stort. Sammantaget borde detta tyda på att vatten ej rann längs randen utan genom betongen.

Vattenpermeabilitet hos betong kan generellt sägas variera ganska mycket. För vattenbyggnadsbetong med vct 0.5 och med relativt stora stenar i betongen så brukar man anta en permeabilitet på ca $10^{-11} - 10^{-12}$ m/s. Detta under förutsättning någorlunda homogen betong utan sprickor eller större "strömrör". Om betong är dåligt vibrerad eller har spruckit under avsvafningsfasen vid gjutningen så kan permeabiliteten bli högre.

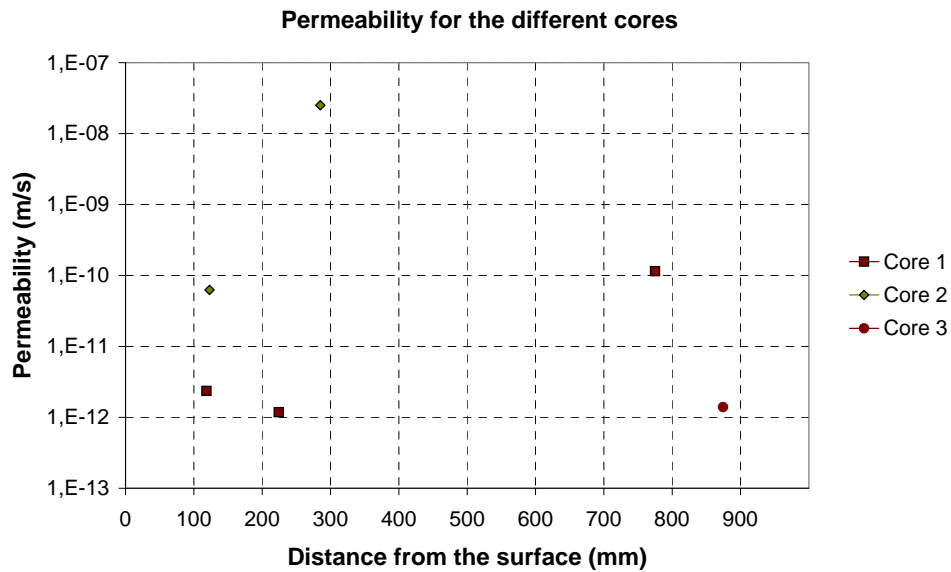
Den uppmätta permeabiliteten hos den aktuella betongen varierade också en del. Permeabiliteten hos cylindrarna 1:3, 1:5 och 3:9 var ca 10^{-12} m/s, d.v.s. i paritet med "normal" betong. Permeabiliteten hos cylindrarna 1:13 och 2:3 var 10^{-10} m/s, vilket är högre än för "normal" betong, och slutligen hos cylinder 2:6 var permeabiliteten drygt 10^{-8} m/s, vilket är mycket högre än för "normal" betong. Se Figur 8.3 och Figur 8.4.

Betong som varit belägen närmare ytan i slussväggen (i skiktet 0-400 mm med "fet" betong) och som hade hög permeabilitet (cylindrar 2:3 och 2:6) innehöll troligen relativt få men distinkta, större flödeskanaler där det mesta av vattenflödet gick i, medan betongen däremellan var relativt tät. Flödeskanalerna består troligen av sammanhängande hålrum som bildats genom ofullständig kompaktering under gjutstadiet och som kan ha utvidgats genom åren i takt med att material har urlakats från kanalernas väggar.

Betong med hög permeabilitet som varit belägen längre in i betongen (cylinder 1:13 som kom från det område 400 mm och inåt med mager betong) verkade generellt vara mer porös och hade en "homogen" högre permeabilitet, d.v.s. inte bara i distinkta flödeskanaler.



Figur 8.3 Uppmätt vattenpermeabilitet hos cylindrar. 1) = tät ballong sattes på uppströmssidan av provkroppen varvid vattenflödet stoppade. Spec 1:3 = cylinder 3 från borrkärna 1, o.s.v., se Figur 8.1.



Figur 8.4 Uppmätt vattenpermeabilitet vid olika djup från ytan hos de olika borrkärnorna. Core 1 = borrkärna 1, o.s.v.

Slutsats:

Betongen verkar ha rikligt med enstaka men större, distinkta flödeskanaler genom den ”fetare” yttre skiktet, vilket har lett in vatten till det inre, mer ”magrare” skiktet av betong.

Repeterbarheten hos permeabilitetsmätningen var god – både vid avbrott/återstart av provning samt under provningen fortskridande uppmättes i stort sett samma permeabilitet för respektive provkropp.

8.2 Vattenmättnadstest

8.2.1 Introduktion

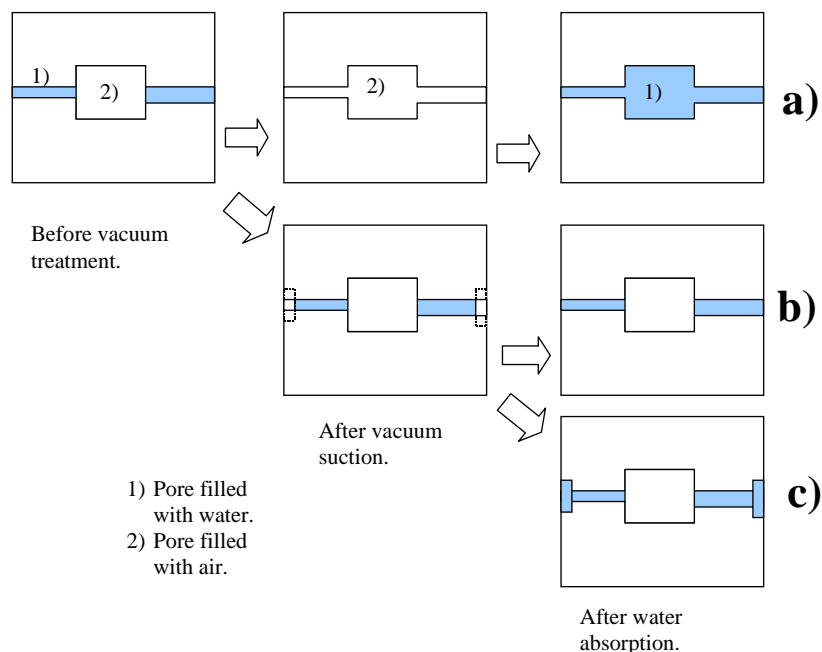
En kritisk aspekt med avseende på vattenpermeabilitet hos porösa material är hur vattenmättad materialet är. Understiger porfyllnadsgraden total vattenmättnad så råder inte ren Darciansk permeabilitet. Ett sätt att uppnå vattenmättnad hos porösa material såsom t.ex. betong och cementbruk är att:

- Först lägga provkropparna i en tät behållare och vakuumsuga ur luften ur kropparna (se BILAGA A).
- Sedan under vakuum släppa in vatten i behållaren och låta provkropparna suga upp vattnet.

Två stycken sådana vattenmättningar med vakuum utfördes i projektet:

1. ett test där provkropparnas vikt mättes före och efter vakuummättningen. Dessutom provades inverkan av uttorkning i ugn.
2. ett annat test där vattenpermeabiliteten hos provkropparna mättes före och efter vakuummättning.

Tanken är att ej vattenmättade prover ska kunna vattenmättas. I Figur 8.5 visas olika troliga scenario vid vakuumbehandlingen. Vid scenario a) har behandlingen lyckats tömma de vattenfyllda porerna och i det efterföljande påsläppet av vatten så fylls alla porer fullständigt. I scenario b) har däremot behandlingen lyckats tömma endast en del av de vattenfyllda porerna. Vid det efterföljande vattenpåsläppet så fylls den tömda delen av poren igen. Den luftfyllda poren fylls inte med vatten. Detsamma gäller för scenario c) men där antas även att behandlingen ”förstör”, d.v.s. förgrovar de porer som töms på vatten. Önskefallet är a), d.v.s. man vill att alla luftfyllda porer ska fyllas med vatten samtidigt som inte porerna ”förstörs” (för mycket).



Figur 8.5 Tänkbara händelseförlopp vid vakuumbehandling av ej vattenmättat poröst material.

8.2.2 Viktförändring (fuktförändring) före och efter ugn och vakuummätning

Hösten 2003 utfördes provning av tre betongprovkroppar avseende inverkan av upphettning utan fuktskydd (uttorkning) och vakuummätning. Resultatet visas i Tabell 8-1. Provningsen ägde rum på Island. Som synes så blir viktökningen som väntat störst vid ugnstorkning vid +105°C. Frågan är dock om inte materialet blir för mycket förstört i ugnen.

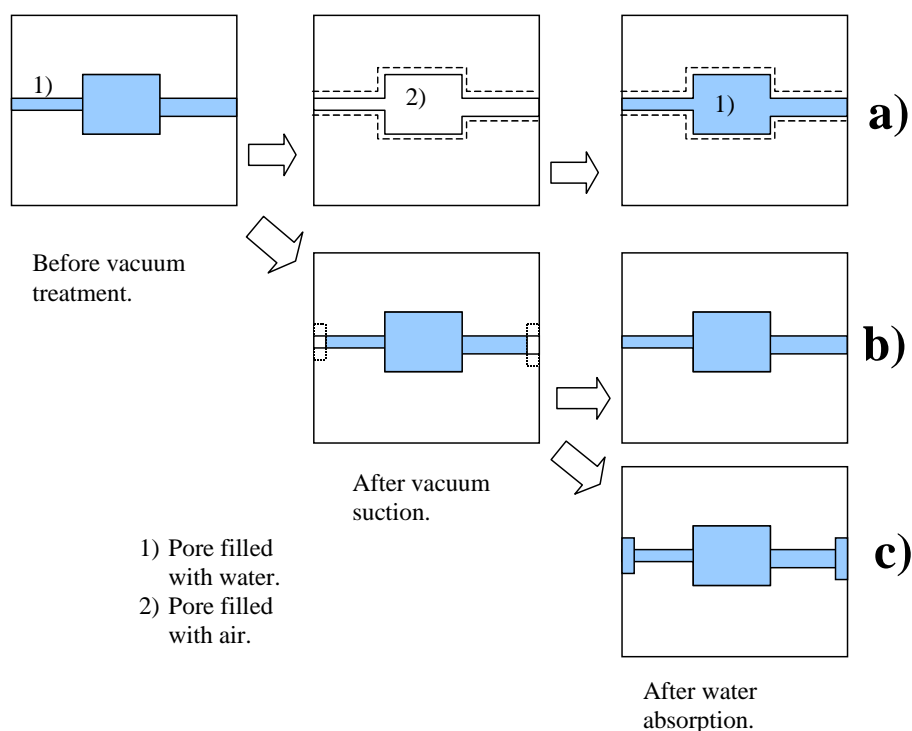
Tabell 8-1 Viktförändring hos betong (recept och ålder okänt) vid uppvärmning (torkning) och vakuummätning.

nr	Provkropp 1 dygn i ugn	Tyngd			Tyngd minskning efter uppvärmning i ugn	Tyngd ökning efter vakuum
		före uppvärmning (g)	efter uppvärmning (g)	efter vakuum (g)		
1	20°C	1958,6	1956,0	1979,7	0,13%	1,1%
2	50°C	2073,3	2064,5	2097,5	0,42%	1,2%
3	105°C	2044,8	1996,3	2076,5	2,37%	1,6%

8.2.3 Permeabilitetsförändring för och efter vakuummätning

I ett försök att utröna om betongprovkropparna vid den föreslagna (BILAGA A) metoden med vakuummätning återfår sin vattenmättnad och samt om permeabiliteten förändras efter vakuummätningen togs de tre provkropparna isär och vakuumbehandlades samt monterades ihop igen i testcellerna varefter vattenflödet igenom dem mättes på nytt. Se Figur 8.7 - Figur 8.9 vid markeringen ”dP=4.0 bar, Sweden, After vacuum saturation”.

Tanken är att de vattenmättade proverna ska kunna tömmas på vatten och sedan vattenmättas igen. Det önskas i alla fall för de större flödeskanalerna som huvudsakligen bestämmer permeabiliteten. I Figur 8.6 visas olika troliga scenario vid vakuumbehandlingen av ett redan vattenmättat poröst material. Vid a) har behandlingen lyckats tömma de vattenfyllda porerna och i den efterföljande påsläppet av vatten så fylls alla porer fullständigt. Eventuellt kan porerna tänkas förgrovas. I b) har däremot behandlingen lyckats tömma endast en del av de vattenfyllda porerna. Vid det efterföljande vattenpåsläppet så fylls den tömda delen av poren igen. Detsamma gäller för c) men där antas även att behandlingen "förstör", d.v.s. förgrovar de porer som töms på vatten. Önskefallet är a), d.v.s. man vill att alla porer först ska tömmas fullständigt på vatten och sedan fyllas med vatten igen, samtidigt som inte porerna "förstör" (för mycket).



Figur 8.6 Tänkbara händelseförlopp vid vakuumbehandling av ett vattenmättat poröst material.

Det visade sig att permeabiliteten höjdes relativt litet, ca 40% för provkropp nr 1, ca 50% för nr 2 och ca 100% för nr 3. Det ska ställas i relation till att andra försök, t.ex. Powers (1958), Ekström (2002) som gett en ökning på ca 70 – 100 gånger högre permeabilitet om provkropparna har torkats i ugn i ca 55°C. Försöket antyder att den föreslagna metoden kan vara lämplig. Upphetas, eller till och med uttorkas (ej fuktisolerade), provkroppar i ugn så höjs däremot permeabiliteten betydligt.

Dock föreligger det en osäkerhet i försöket angående om hur väl porsystemet och speciellt de större flödeskanalerna, tömdes på vatten i den inledande vakuumsugning i luft, se resonemang ovan. Eventuellt kan enbart de ytligare och största flödeskanalerna ha tömts på vatten för att sedan återfyllas igen när vatten släpptes på.

Om en verklig betong innehåller inestängd luft innanför vattenfyllda porer så behövs detta vatten tömmas innan innanförliggande luft kan evakueras. Kan inte

vakuumsugningen tömma sådana vattenfyllda ”fickor” så blir inestängd luft kvar när vatten släpps på efter vakuumsugningen, vilket innebär att permeabiliteten blir lägre än om luften hade försvunnit och hela flödeskanalen hade blivit vattenfylld.

Även om metoden är lovande behövs det utföras fler provningar med vakuummätning inklusive mätning av vikter och permeabilitet för att verifiera om metoden är den bästa.

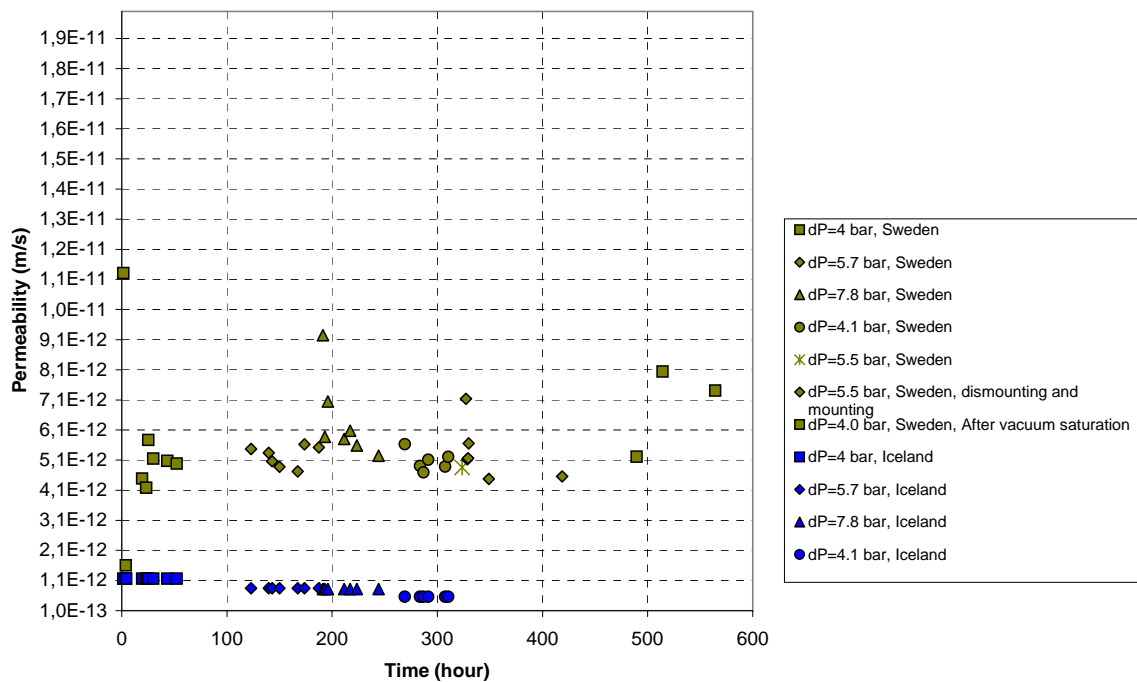
8.3 Round-Robin test

10 år gamla betongprovkroppar med diametern ϕ 104 mm och längden $L = 49$ mm provades först på Island och sedan i Sverige. Provingen omfattade:

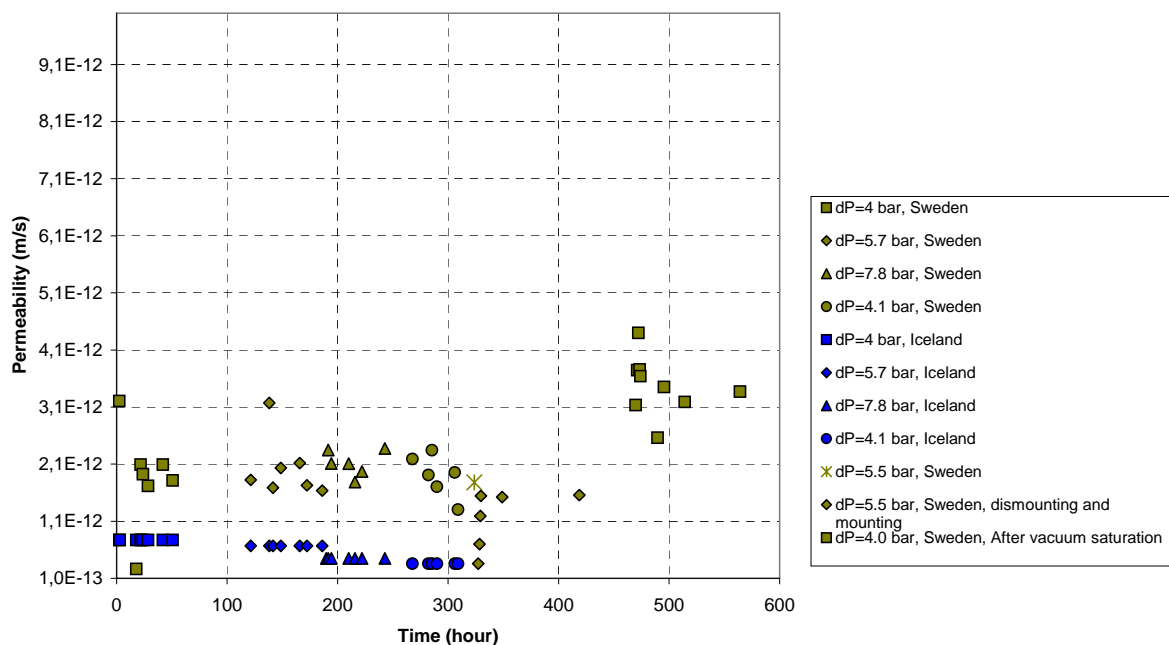
- 1 Provning på Island (the Icelandic Building Research Institute i Reykjavik) vid trycken 4.0, 5.7, 7.8 och slutligen 4.1 bar. Provkropparna fanns i testcellerna hela tiden, endast trycket varierades.
- 2 Demontage av provkropparna som sedan skickades till Sverige (LTH, avdelningen för byggnadsmaterial i Lund).
- 3 Provning i Sverige vid samma tryck och förhållande som gällde vid provningen på Island.
- 4 Ett ytterligare tryck provades i Sverige som avslutning av den första omgången, nämligen 5.5 bar.
- 5 Provkropparna togs ur testcellerna och monterades om igen och provades vid 5.5 bar. Detta gjordes för att se om den mätta permeabiliteten förändrades vid nytt montage.
- 6 Provkropparna togs ur testcellerna igen. De vägdes över och under vatten. De utsattes för vakuumbehandlingen, d.v.s. de vakuumsögs i luft under 1 dygn varefter vakuumpumpen stängdes av och vatten släpptes in under vakuum.
- 7 Provkropparna monterades igen och utsattes ånyo för ett ensidigt vattentryck, nu på 4.0 bar. Detta gjordes för att se om den mätta permeabiliteten förändrades vid nytt vakuumbehandlingen.

Resultatet visar att:

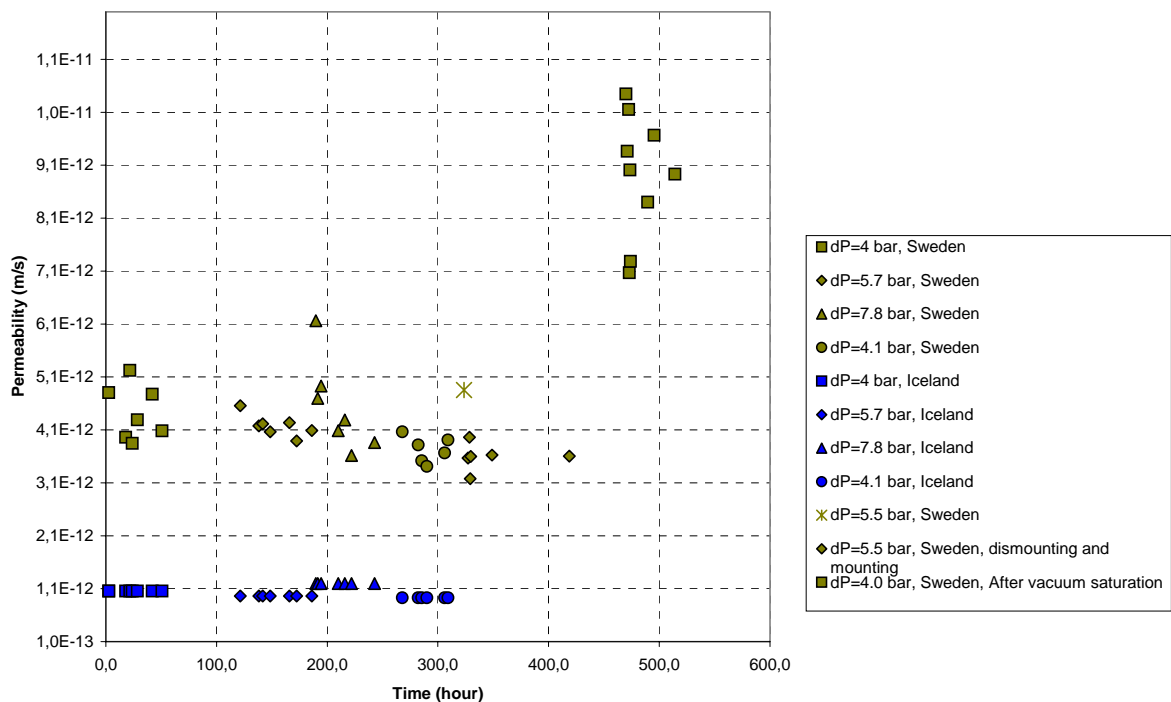
- **Reproducerbarheten** var tyvärr inte så god – mätt genomflödat vatten ökade ca 5, 2 och 4 gånger för provkroppar 1, 2 respektive 3 vid likadant test i Sverige som på Island. Det kan dock ha att göra med att mätningen av utflödat vatten genom provkropparna mättes bara 1 gång per ny trycknivå på Island, medan detsamma gjordes ca 7 – 9 gånger vid varje trycknivå. Med tanke på att flödet kan variera något under en och samma mätning på grund av olika anledningar (se Ekström & Jonsson 2005 avsnitt ”felkällor”) innan ”steady-state” flöde inställer sig så kan en avläsning per trycknivå ha varit för sällan.
- **Repeaterbarheten** var god, d.v.s. att när provkropparna demonterades och monterades igen så fick man samma permeabilitet.
- **Giltigheten** av Darcy’s lag var god, d.v.s. permeabilitetskoefficienten var linjärt beroende av pålagt tryck.



Figur 8.7 Vattenpermeabilitet för provkropp nr 1, mätt på Island och i Sverige och vid olika differenstryck. I Sverige demonterades provkroppen och monterades ihop igen samt detsamma plus vakuummätning av vatten.



Figur 8.8 Vattenpermeabilitet för provkropp nr 2, mätt på Island och i Sverige och vid olika differenstryck. I Sverige demonterades provkroppen och monterades ihop igen samt detsamma plus vakuummätning av vatten.



Figur 8.9 Vattenpermeabilitet för provkropp nr 3, mätt på Island och i Sverige och vid olika differensstryck. I Sverige demonterades provkroppen och monterades ihop igen samt detsamma plus vakuummätning av vatten.

8.4 Prov med relativt tät betong med cement malt med silika

I augusti 2004 testade betong med relativt lågt v/c-tal och cement med 4% silika. Recepten var enligt nedan:

Cement: Isländsk Kraftcement (med 4% silika), CEM I, 428 kg/m³
v/c-tal: 0,42
Ballast: Isländsk basalt, 1660 kg/m³

Resultat från tester utförda:

Färsk betong

luft 6%
sättnått 200 mm
densitet 2336 kg/m³

Hårdnad betong

Tryckhållfasthet:

7 dygn 26,6 MPa
28 dygn 37,2 MPa

Frostbeständigheten enligt SS 13 72 44:

28 dygn 0,05 kg/m²
56 dygn 0,11 kg/m²

Vattenpermeabilitet:

Vattenpermeabiliteten testades på utborrade cylindrar enligt den metod som presenteras här i denna rapport och i det föreslag till standard som finns i BILAGA A. Proven utfördes när betongen var 28 dygns gammal. Vattentrycket sattes till 14,5 bar i ca 2 månader då provet bröts p.g.a tidsbrist. Efter 2 månades test fanns det fortfarande inget vattenflöde genom provkropparna.

Vad detta beror på är inte klart. När man har så lågt v/c-tal med inblandat silika kan man fortfarande efter 28 dygn ha så pass mycket oreagerad cement att betongen använder det lilla flödet som tränger sig in i betongen till en fortsatt hydrataion, dels mellan cementkorn och vatten och dels mellan calciumhydroxid, vatten och silika. Denna fortsatta hydrataion medför dels att betongen blir tätare och dels att betongen torkar ut, vilket i sig medför att luften i de uttorkade porerna täpper till. Genomsipprande vatten används också till den fortsatta hydrataionen. Permeabiliteten minskar samt flödet dämpas, det är inte fråga om Darciansk permeabilitet.

9 Slutsatser

Metoden och utrustningen verkar fungera väl. Den Darcianska vattenpermeabiliteten kan undersökas för såväl gjutna som utborrade provkroppar. Se Ekström & Jonsson (2005) för en beskrivning av den Nordtestmetod som är föreslagen (BILAGA A).

Dock är det en fördel om fler vattenmättningsförsök kan göras med den föreslagna vattenbehandlingen (vakuumsugning i luft efterföljt av insläpp av vatten under fortsatt vakuum) av olika provkroppar med olika fukthalter för att undersöka inverkan av metoden på permeabiliteten.

Likaså är det en fördel om fler Round-Robin test kan göras för att undanröja det tvivel som kan finnas av reproducerbarheten efter det test som utfördes i detta projekt (Island – Sverige).

Används betong med lågt vct eller ung betong finns det alltid en risk för att ohydratiserade cementkorn finns inuti betongen, vilket kan medföra en fortsatt hydratation när vatten börjar passera igenom betongen vid ett permeabilitetstest. Flödet kan då bli ej-Darcianskt med olinjär permeabilitet och luft i porsystemet som dämpar samt att genomsipprande vatten används till hydratationen.

10 Referenser

Cederwall K., Larsen P. (1979), "Hydraulics for civil engineers" (in Swedish), Liber läromedel, Malmö.

Darcy H. (1856), "Les fontaines publiques de la ville de Dijon", Dalmont, Paris.

Ekström T. (2003), "Leaching of concrete – The leaching process and its effects", Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, 2003.

Ekström T., Jonsson G. (2005), "CONCRETE, MORTAR, HARDENED: water permeability of WATER-SATURATED concrete", Föreslagen, ännu ej utgiven ny Nordtestmetod.

Hearn N. (1992), Saturated permeability of concrete as influenced by cracking and self-healing, Dissertation submitted to the University of Cambridge.

Hooton R.D. (1989), "What is needed in a permeability test for evaluation of concrete quality", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 137.

Mills R.H. (1986), "Gas and water permeability of concrete for reactor buildings – small specimens", Research report INFO 0188-1. Atomic Energy Control Board, Ottawa.

Powers T.C., Mann H.M., Copeland L.E. (1958), "Flow of water in hardened Portland cement paste", Highway Res. Branch, special report no 40.

Ruetters, A., Vidal, E. N., Wing, S. P. (1935), "An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder Dam", ACI Journal, Proceedings 1935(31):4, pp. 382-416.

BILAGA A Föreslagen ny Nordtestmetod

Se NT Build 506, www.nordicinnovation.net/nordtest.cfm



norden

Nordic Innovation Centre

Return address:
Nordic Innovation Centre,
Holbergs gate 1,
NO-0166 Oslo, Norway

NORDTEST

NORDTEST is a Nordic Innovation Centre brand offering competence and expertise in the field of harmonizing of norms and methods, a large Nordic net-work of experts, more than 650 recommended Nordic testing methods and 550 published technical reports.

www.nordicinnovation.net

Nordic Innovation Centre

The Nordic Innovation Centre initiates and finances activities that enhance innovation collaboration and develop and maintain a smoothly functioning market in the Nordic region.

The Centre works primarily with small and medium-sized companies (SMEs) in the Nordic countries. Other important partners are those most closely involved with innovation and market surveillance, such as industrial organisations and interest groups, research institutions and public authorities.

The Nordic Innovation Centre is an institution under the Nordic Council of Ministers. Its secretariat is in Oslo.

For more information: www.nordicinnovation.net