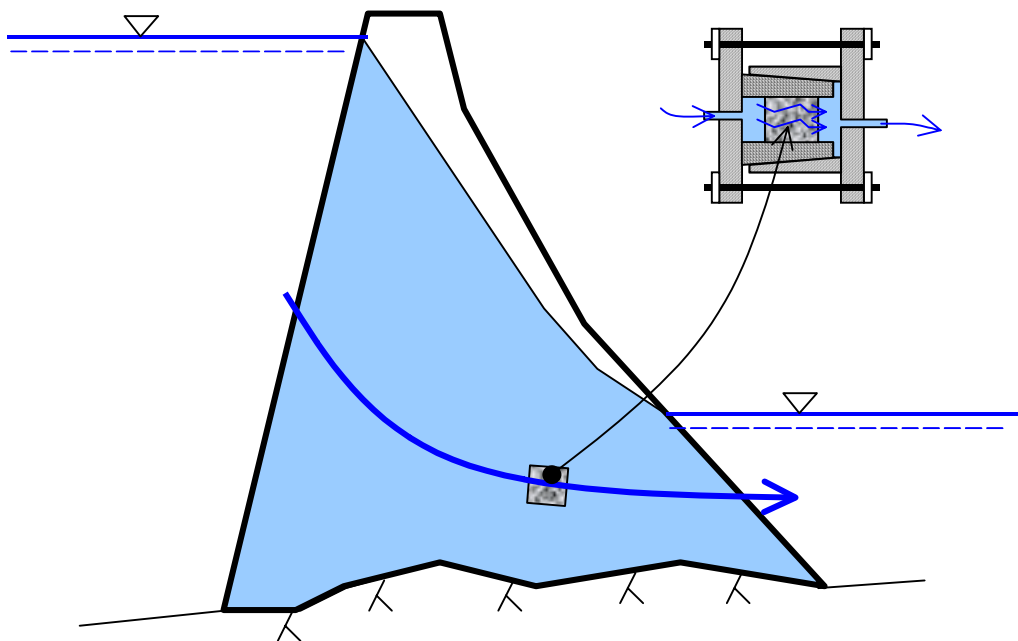


Metod för bestämning av vattenpermeabilitet hos betong

Elforsk rapport 06:19

Metod för bestämning av vattenpermeabilitet hos betong

Elforsk rapport 06:19



Metod för bestämning av vattenpermeabilitet hos betong

Elforsk rapport 06:19

Tomas Ekström, Carl Bro AB
Guðni Jónsson, The Icelandic Building Research Institute

Förord

Svenska vattenkraftföretag har sedan 1995 finansierat betongtekniskt utvecklingsarbete inriktat mot vattenkraftföretagens behov.

Syftet med den verksamhet som bedrivs är att stå för ett kvalificerat stöd till vattenkraftföretagen i de byggfrågor som faller under hela den tekniska förvaltningskedjan. Målet är att ta fram verktyg, riktlinjer, utförandebeskrivningar och teknik som fyller industrins behov, bl.a. genom ett koppla resultat till RIDAS med tillämpningsanvisningar. Målet är också att utifrån industriperspektiv bygga kompetens på olika håll i samhället där så behövs. En viktig del är att medverka till att det kommer fram studenter, tekniska licentiater och doktorer som har genomfört arbeten inom områden som ligger nära branschens intressen.

Programmet administreras med hjälp av en programstyrelse med följande ledamöter:

Kenneth Burstedt, E.ON Vattenkraft Sverige
Malte Cederström, Vattenfall Vattenkraft
Tommy Flodin, Fortum
Carl-Oscar Nilsson, Fortum
Erik Nordström, Vattenfall Vattenkraft
Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen
Lars Hammar, Elforsk

Stockholm Januari 2006

Lars Hammar
Elforsk AB

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. Upphettnings eller torknings 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	1
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	26
9	SLUTSATSER	27
10	REFERENSER	28

Bilagor

BILAGA A	FÖRESLAGEN NY NORDTEST STANDARD
-----------------	--

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 2002). 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.

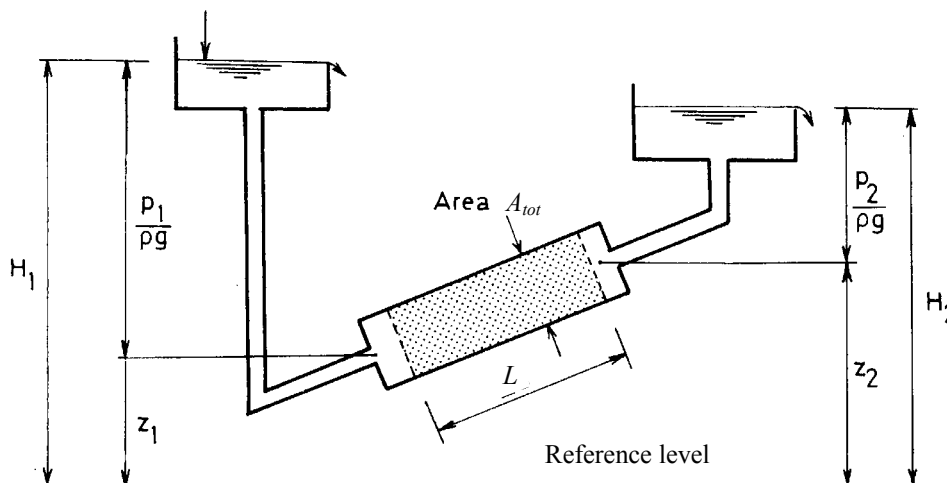
- Härdnings sättet har varit olika (uttorkning, uppvärmning, i luft, ånga eller vatten, etc.)
- Inflödande vattenkvaliteten har varit olika.
- Permeabiliteten har mätts vid olika tidpunkter eller provningen har pågått olika lång tid (permeabiliteten förändras oftast med tiden).
- Olika ålder av betong 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, genomsipprande 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 stålcylinder som innesluter en provkropp. Någon slags tätning brukar användas mot oönskade läckage mellan provkropp och stålcylinder. 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 stålcylindern 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 självätar 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:

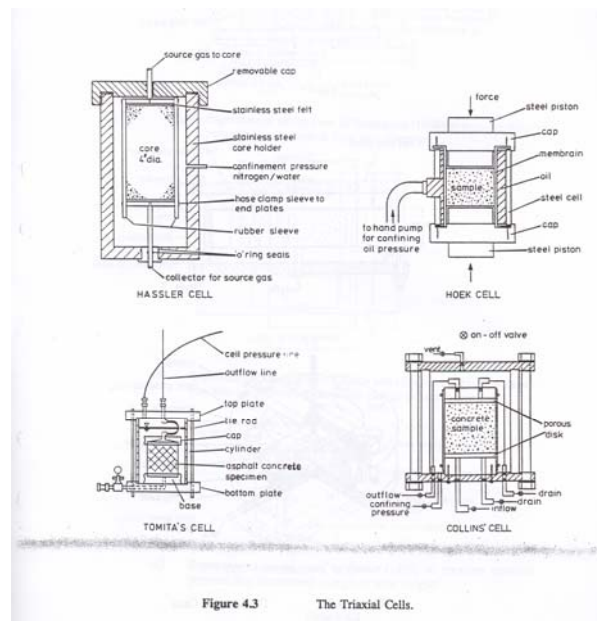
- Cellerna har satts i anslutning till en verklig anläggning, t.ex. i en vattenkraftstation och trycksatt vatten har letts direkt från den uppströms belägna vattenreservoaren.
- En gasflaska har utövat ett tryck på en vattenyta i ett kärl och detta vatten har då trycksatts.
- En pump har tryckt in vatten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

2.5 Mätning av vattenflöde

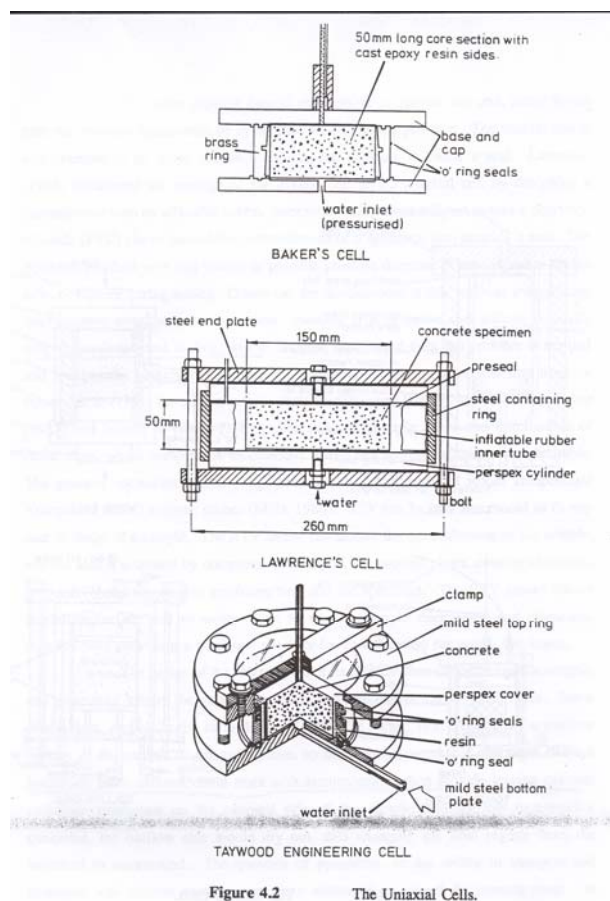
Olika typer av metoder för mätning av vattenflöde har använts genom åren:

- 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)

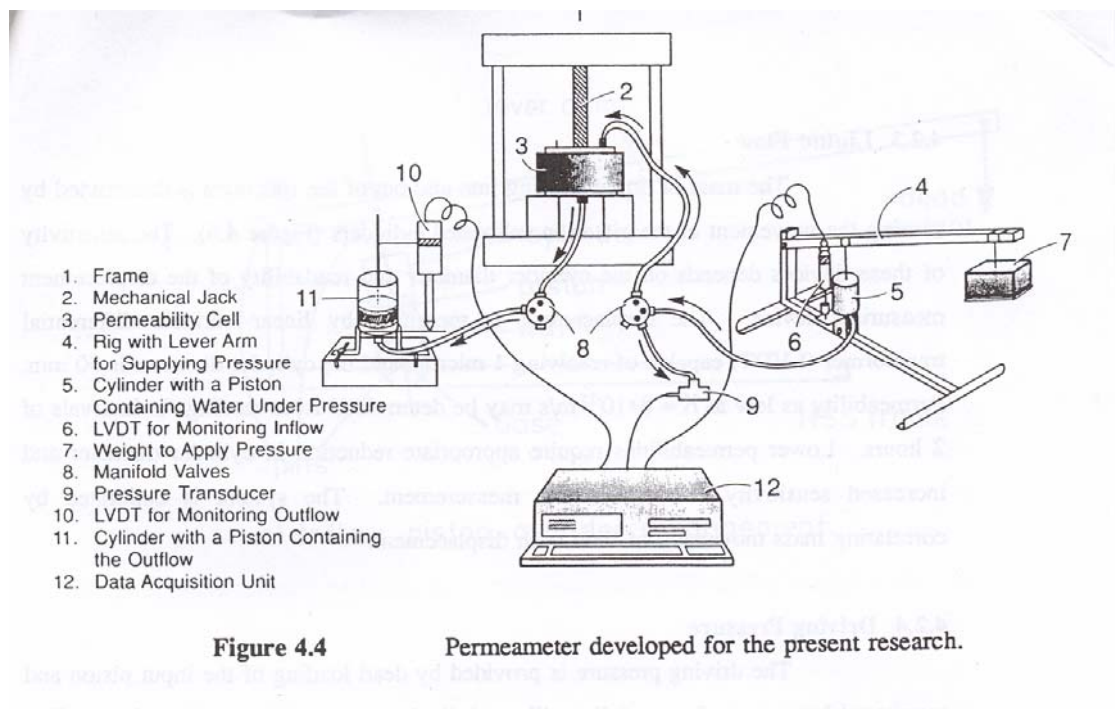


Figure 4.4 Permeameter developed for the present research.

Figur 2.4 Exempel 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).

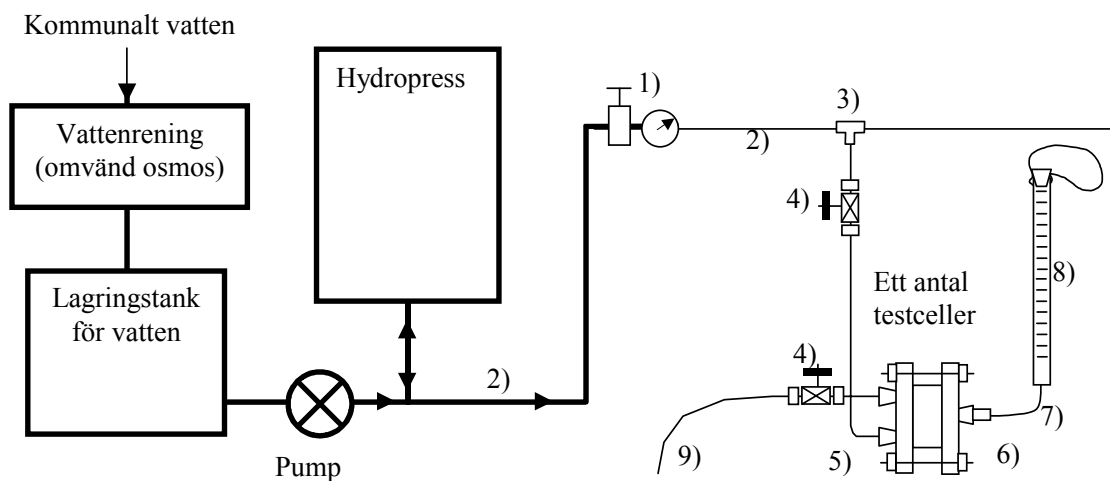
Utrustningen på Island har byggts under år 2003 och består huvudsakligen av tre delar:

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 använda 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.



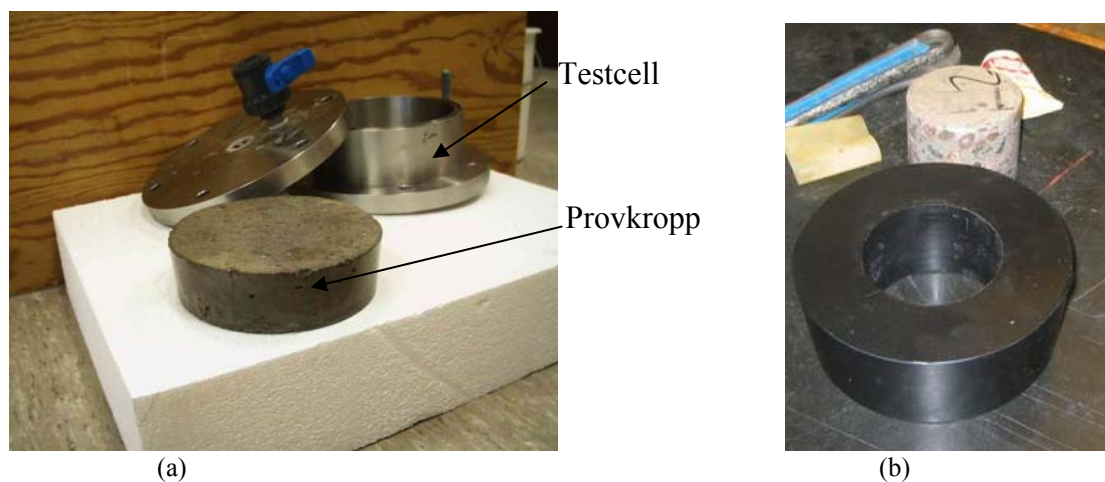
- 1) Tryckreduceringsventil + manometer.
- 2) Tub av plast eller stål.
- 3) Tubgren.
- 4) Avstängningsventil.
- 5) Tubanslutning till cell.
- 6) Anslutning cell-mätanordning.
- 7) mjuk slang.
- 9) Slang för luftning av uppströmssidan.

- 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

8.1 Doktorandprojekt 1997 – 2003 på LTH

Se Ekström (2003).

8.2 Provning av betong i slussvägg

8.2.1 Allmänt

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

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

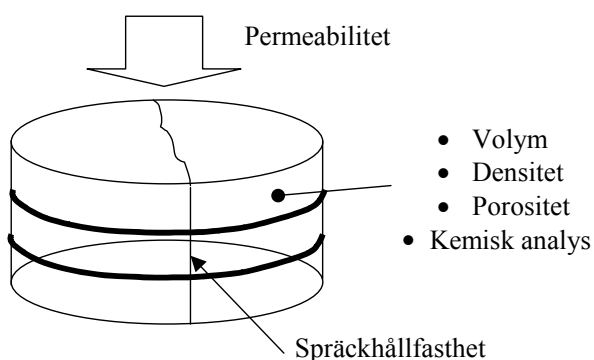
Ströskelns överkant befinner sig ca 15 m under uppströms vattenyta och ca 7 m under nedströms vattenyta. Följande egenskaper provades i betonghärnorna:

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

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

Borrkärna 1	475 mm 605 mm 750 mm																Diameter					
	1	2	3	4	5	6	7	8		9		10	11	12		13	14	15	16	104		
	Tjocklek																			mm		
	Permeabilitet																					
	Spräckprov																					
Borrkärna 2	475 mm 700 mm 750 mm 1300 mm																		Diameter			
	1	2	3	4	5	6		7		8	9	10	11	12	13	14	15	16		17	18	104
	Tjocklek																					mm
	Permeabilitet																					
	Spräckprov																					
Borrkärna 3	345 mm 850 mm														Diameter							
		1	2	3	4	5	6	7	8		9	10	11	12	13	14					104	
	Tjocklek																			mm		
	Permeabilitet																					
	Spräckprov																					

Figur 8.1 Beskrivning av de tre olika borrhämnarna. Ände längst till vänster har vett mot vattnet i slussen. Varje borrhämn kapades i ett antal mindre cylindrar. Vid varje sågsnitt 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.

8.2.2 Vattenpermeabilitet

Permeabiliteten provades på några av cylindrarna från borrhämnarna, 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 borrhämn 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

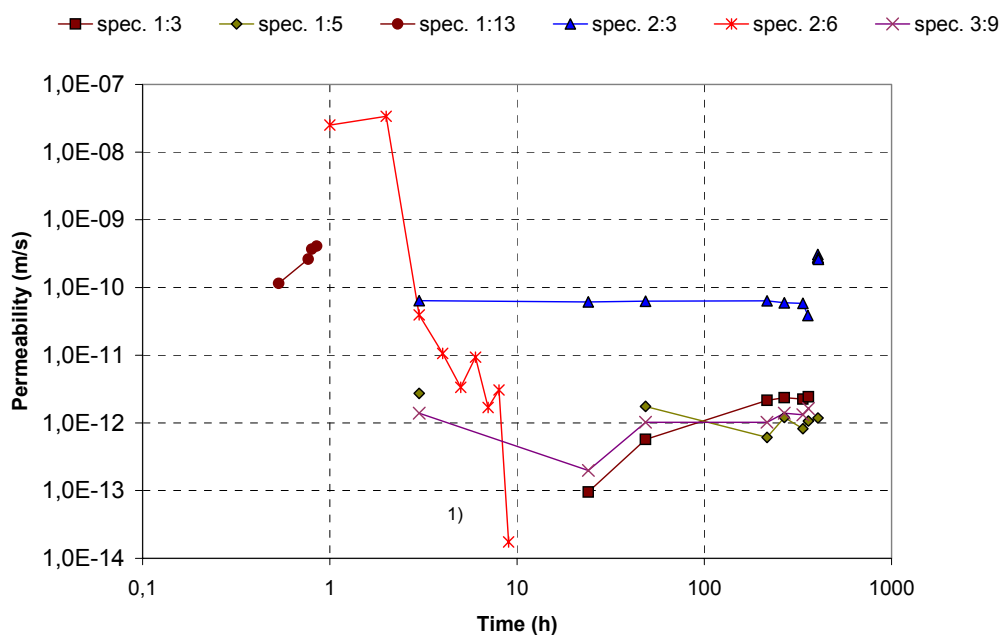
försöken, provkropparna monterades om igen och när vattenpressningen återupptogs så var alltid vattenflöde lika stort. Sammantaget borde detta tyda på att vatten ej rann längs randen utan igenom betongen.

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 avsvalningsfasen vid gjutningen så kan permeabiliteten bli högre.

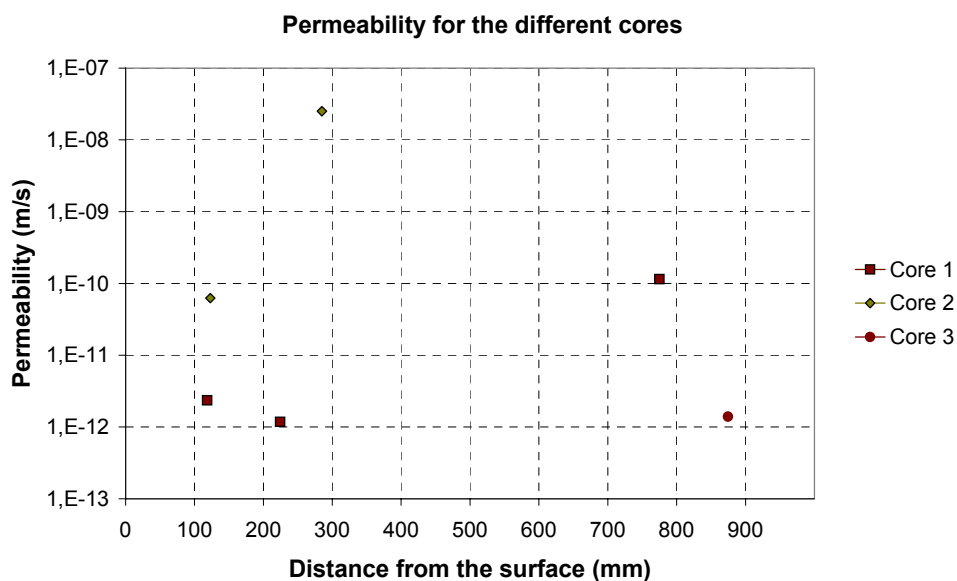
Den uppmätta permeabiliteten hos den aktuella betongen varierade också en del. Permeabiliteten hos cylindrarna 1:3, 1:5 och 3:9 var ca 10^{-12} m/s, d.v.s. i paritet med ”normal” betong. Permeabiliteten hos cylindrarna 1:13 och 2:3 var 10^{-10} m/s, vilket är högre än för ”normal” betong, och slutligen 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 borrhärna 1, o.s.v., se Figur 8.1.



Figur 8.4 Uppmätt vattenpermeabilitet vid olika djup från ytan hos de olika borrhärnorna. Core 1 = borrhärna 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.

8.3 Vattenmättnadstest

8.3.1 Introduktion

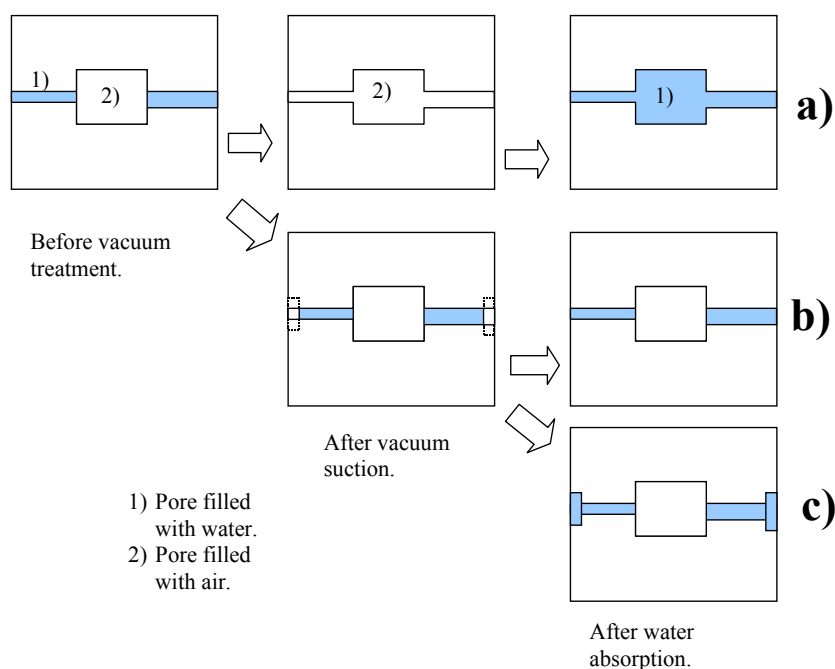
En kritisk aspekt med avseende på vattenpermeabilitet hos porösa material är hur vattenmättad materialet är. Understiger porfyllnadsgraden total vattenmättnad så råder inte ren Darciansk permeabilitet. Ett sätt att uppnå vattenmättnad hos porösa material såsom t.ex. betong och cementbruk är att:

- 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.

8.3.2 Viktförändring (fuktförändring) före och efter ugn och vakuummättnings

Hösten 2003 utfördes provning av tre betongprovkroppar avseende inverkan av upphettning utan fuktskydd (uttorkning) och vakuummättnings. 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.

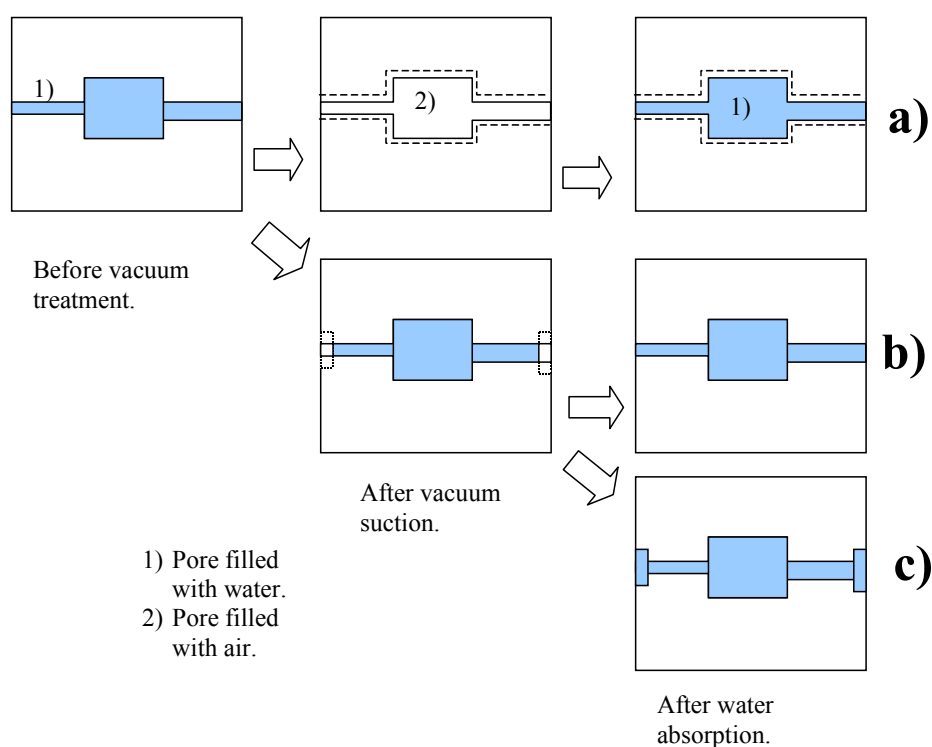
Tabell 8-1 Viktförändring hos betong (recept och ålder okänt) vid uppvärmning (torkning) och vakuummättnings.

Provkropp		Tyngd			Tyngd minskning	Tyngd ökning
nr	1 dygn i ugn	före	efter	efter	efter uppvärmning	efter vakuum
		uppvärmning	uppvärmning	vakuum	i ugn	
		(g)	(g)	(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%

8.3.3 Permeabilitetsförändring för och efter vakuummättnings

I ett försök att utröna om betongprovkropparna vid den föreslagna (BILAGA A) metoden med vakuummättnings återfår sin vattenmättnad och samt om permeabiliteten förändras efter vakuummättningsen 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 "förstörs" (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. Upphettas, 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 vakuumsugningen i luft, se resonemang ovan. Eventuellt kan enbart de yttligare 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 vakuumsugning tömma sådana vattenfyllda ”fickor” så blir inestängd luft kvar när vatten släpps på efter vakuumsugning, 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.

8.4 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. Provningsen omfattade:

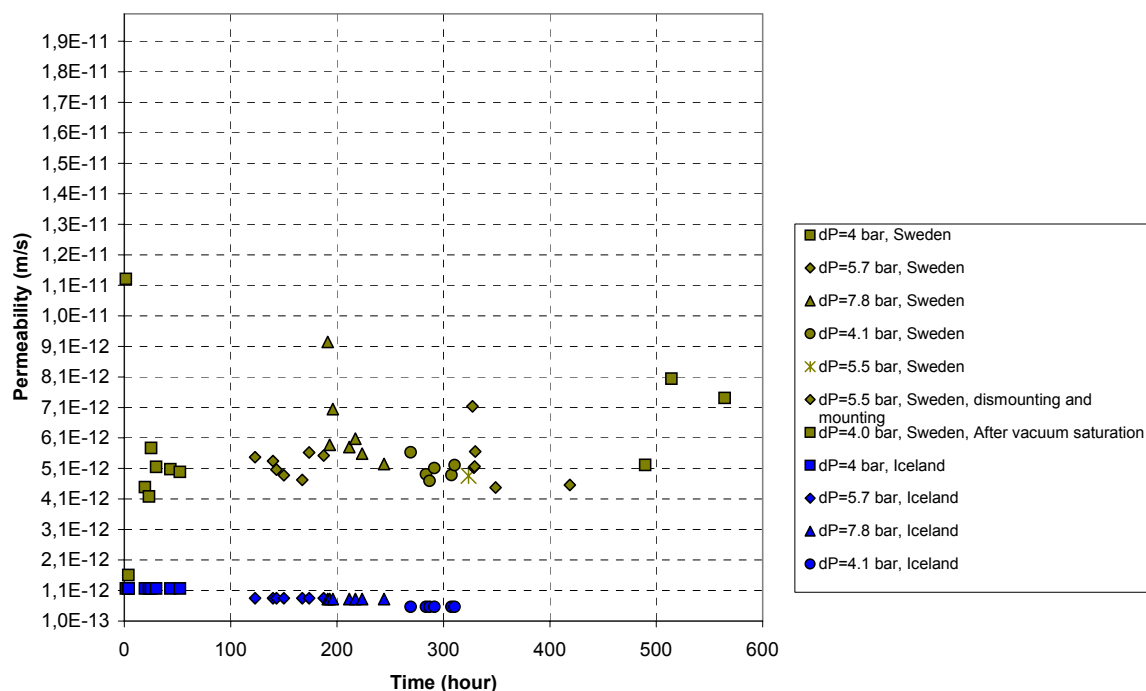
- 1 Provning på Island (the Icelandic Building Research Institute i Reykjavik) vid trycken 4.0, 5.7, 7.8 och slutligen 4.1 bar. Provkropparna fanns i testcellerna hela tiden, endast trycket varierades.
- 2 Demontage av provkropparna som sedan skickades till Sverige (LTH, avdelningen för byggnadsmaterial 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 vakuumstögs 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:

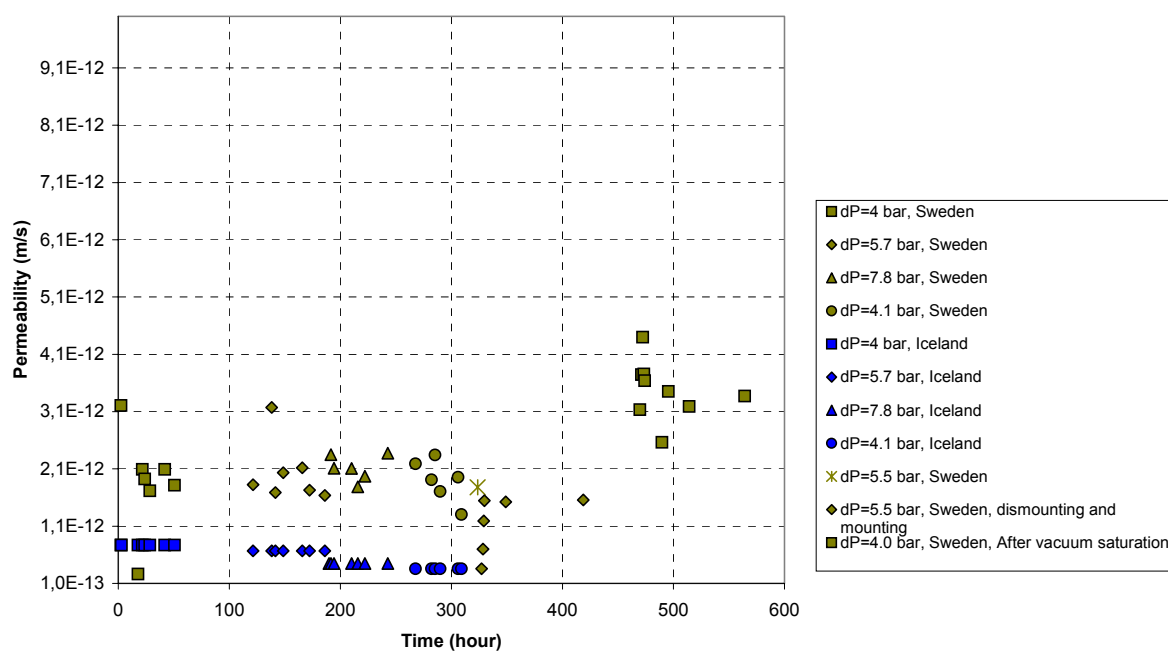
- **Reproducerbarheten** var tyvärr inte så god – mätt genomflödat vatten ökade ca 5, 2 och 4 gånger för provkroppar 1, 2 respektive 3 vid likadant test i Sverige som på Island. Det kan dock ha att göra med att mätningen av utflödat vatten genom provkropparna mättes bara 1 gång per ny trycknivå på Island, 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 2004 avsnitt ”felkällor”) innan ”steady-state” flöde inställer sig så kan en avläsning per trycknivå ha varit för sällan.

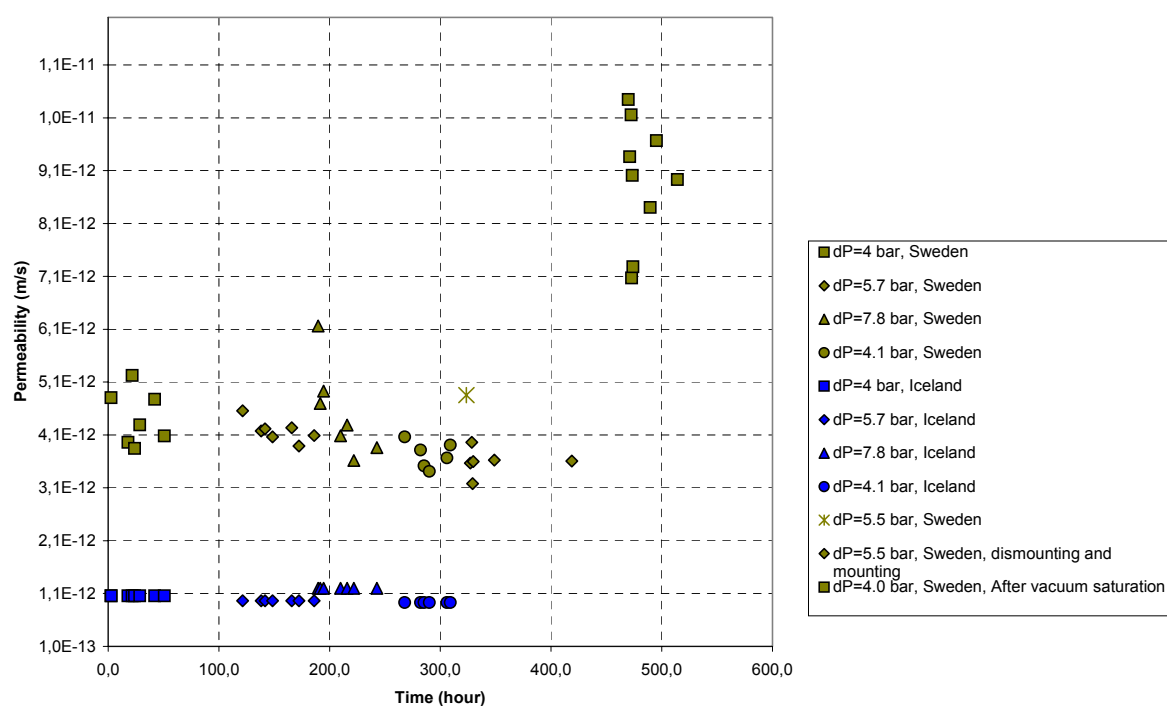
- **Repeterbarheten** var god, d.v.s. att när provkropparna demonterades och monterades igen så fick man samma permeabilitet.
- **Giltigheten** av Darcy's lag var god, d.v.s. permeabilitetskoefficienten var linjärt beroende av pålagt tryck.



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 differenstryck. I Sverige demonterades provkroppen och monterades ihop igen samt detsamma plus vakuummätning av vatten.

8.5 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 förslag 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. Genomsippande 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 (2004) för en beskrivning av den Nordteststandard som är föreslagen (BILAGA A).

Dock är det en fördel om fler vattenmättningsförsök kan göras med den föreslagna vattenbehandlingen (vakuum suging 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. (2004), "CONCRETE, MORTAR, HARDENED: water permeability of WATER-SATURATED concrete", Föreslagen, ännu ej utgiven ny Nordteststandard.

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 Nordtest standard (Troligen NT Build 506)

CONCRETE, MORTAR, HARDENED: Water permeability of water-saturated concrete

1 Scope

This NORDTEST method is intended for the determination of the water permeability of cast or drilled test specimens of hardened, water-saturated concrete or mortar.

2 Field of application

The method is applicable to hardened specimens either:

- cast in laboratory or
- drilled specimens from field structures or from specimens cast in laboratory.

The method measures the Darcian (steady-state) permeability of water through mortar or concrete. This method cannot be directly compared with other methods that measure only the depth of penetration of water.

3 References

- /1/ NT BUILD 201 "Concrete: Making and curing of moulded test specimens for strength tests" 2nd ed., Approved 1984-05.
- /2/ NT BUILD 202, "Concrete hardened: Sampling and treatment of cores for strength tests" 2nd ed., Approved 1984-05.
- /3/ SS 13 72 14 "Concrete testing – Hardened concrete – Impermeability"
- /4/ Ekström, T., "LEACHING OF CONCRETE, The leaching process and its effects" Lunds institute of Technology, Division of Building Materials, Lund, Sweden, 2003.
- /5/ Hearn, N., "SATURATED PERMEABILITY OF CONCRETE AS INFLUENCED BY CRACKING AND SELF- SEALING" Peterhouse, Cambridge, England.
- /6/ "Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity", European standard.
- /7/ Ekström T., Jónsson G. (2005), "Metod för bestämning av vattenpermeabiliteten hos betong", rapport till Nordtest, Malmö och Reykjavik, 2005.
- /8/ NT BUILD 492, "Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", Approved 1999-11.

4 Definitions

Permeability: Homogenous, steady-state percolation of water through the material, (Darcian flow).

5 Sampling

5.1 Cast test specimens

- Cast test specimens should be manufactured and cured according to NT BUILD 201, where applicable.
- The measure of the smallest cross section must be three times larger than the nominal maximum particle size in the aggregate.
- Tamping rod compaction shall not be used.
- The upper surface shall be levelled to a smooth and even surface. The tolerance of the end surfaces should be within 1 mm or 0.02 d, where d = diameter of the specimen.
- The storing and curing conditions are very important for the result of permeability. It is important that the concrete is protected against drying out. In difference to NT BUILD 201, the specimens shall not later than 24 hours after the casting be demoulded and should then be stored under lime-saturated water at a temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$ until they are to be tested.
- The age of the specimens when mounted in a permeability test shall be the same as the standard time when measuring compressive strength, mostly 28 days (see for example /6/).

5.2 Drilled test specimens

Core drilled test specimens shall be taken and stored according to NT BUILD 202.

- Test cores from real buildings as well as cores from cast specimen shall be water-saturated before the start of the test, see section 0 below.
- The cores shall be sawn and the end surfaces grinded, if necessary, to achieve a tolerance according to section 0.
- After the cores are saturated with water, they shall be stored under lime-saturated water at a temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$ until they are tested.

5.2.1 Water saturation of specimens

Specimens that are not fully saturated, for example such that are drilled from existing buildings must be saturated with water before the permeability test starts. To saturate concrete without destroying the pore structure and changing the permeability is difficult.

Two main principles are suggested:

- forcing water into the specimen
- sucking water into the specimen

5.2.2 Forcing water into a specimen by external water pressure

When water is forced into (by external water pressure) a specimen the air inside the specimen is forced out of the specimen. This can take different long time depended mainly on the moisture content in the pore system and the size, connection and volume of the pores. Many factors influence, e.g. the quality of the material in the specimen, the history of treatment of the specimen, water content before the test, continued hydration reactions, swelling, etc.

A method that forces the water inside concrete is the Swedish method SS 13 72 14 “Concrete testing – Hardened concrete – Impermeability”. After 24 ± 2 h the specimen is split and the penetration depths is measured. Based on old investigations, the penetration depths are transformed to a permeability coefficient comparable to the permeability coefficient in Darcy’s law.

If the specimen is exposed to external water pressure such a long time that the flow becomes steady-state, the specimen can be assumed to be water-saturated. In such a case the present test method can be used. The possibilities of continuous hydration or leaching must however be regarded if it takes a long time reaching steady-state flow.

5.2.3 Forcing water into a specimen by vacuum treatment

A faster method to water-saturate a specimen than described in section 0, is to vacuum saturate the specimen. A suitable method is described in NT Build 492 section 6.3.2. However, because the sizes of the specimens are often larger, let the pump suck for at least 12 hours before let the water inside the container.

Note 1: In another method specimens are dried in oven before the vacuum treatment. This will probably be a better method for withdrawing all air inside the specimens. On the other hand, this method will much more alter the pore size distribution and porosity and thereby also increase the permeability of the specimen to a large extent.

6 Test method

6.1 Principle

Water-saturated specimens of concrete or mortar are placed in test cells of steel and are exposed to a one-sided water-pressure. Water will flow through the specimens. The specimens can, as mentioned above, either be cast in the test cells or they can be drilled cores, taken from a larger body of concrete. Cores can be taken for example from existing, real structures or from larger volumes of concrete cast in laboratory. The amount of water penetrating through the specimens is measured.

6.2 Apparatus

The apparatus consist of three main parts:

- a pressure side, i.e. equipment to establish requested water pressure
- a number of test cells where the concrete specimens are located
- measuring equipments and other things

6.2.1 Pressurising equipment

The pressurising equipment is here not standardised in detail. Some requirements shall however be fulfilled:

- All parts shall be made of acid-proof materials.
- The pressurising shall not bring any substance into the water that can be aggressive to the test specimens.
- The pressurising shall not bring any additional air into the water except air dissolved at atmospheric conditions. Entrapped air upstream the specimen must be evacuated.

An example of pressuring equipment is shown in (Annex A).

6.2.2 Test cells

The test cells are here not standardised in detail. Some requirements shall however be fulfilled:

- All parts shall be made of acid-proof materials.
- The sealing between the specimen and the test cell shall be of the *active* type /7/
- The pressurising shall not bring any additional air into the water except air dissolved at atmospheric conditions.

An example of a design of test cells is shown in (Annex A). The sealing is here fulfilled by using test cells that are conical inside and in combination with conical specimens (cast in the cells) or conical plastic “plugs” together with out-drilled specimens.

6.2.3 Water flow measuring

The method for measuring the flow of water coming out from the specimens is here not standardised in detail. Some requirements shall however be fulfilled:

- The out-flow end of the specimen must be filled with water to avoid contact with air before water have percolated out from the specimen.
- All parts shall be made of materials resistant to alkali (high pH-values).
- The measuring exactness shall be suitable to the amount of water that comes out from the specimens. Some concrete has very low and some very high permeability. It should be possible to read the amount of water in an exact way, but on the other hand, the water shall not spill over the measuring vessel.
- The measuring vessels shall not let air in or moisture out. If air is let in the CO_2 in it will form CaCO_3 with the percolated solution coming from the specimen. If moisture is let out the correctness of measured volume of water will be wrong.

An example of measuring water flow is shown in (Annex A).

6.3 Mounting of cylindrical specimens in the test equipment

The following procedure is proposed (see also (Annex B)):

1. The test specimens are taken from the storing water one by one.
2. After being in open air for about 2-3 minutes, silicon grease is smeared on the outer, surface dry, cylindrical surface of the specimen.
3. A latex tube is forced around the cylindrical surface.
4. Silicon grease is applied to the latex tube and to the inside surface of the plastic plug in which the specimen is later mounted. The grease and the latex tube are used to achieve a perfect sealing.
5. Oil (e.g. form oil) is applied on the conical, outer surface of the plastic plug and on the inside surface of the steel cylinder so the plug easy is pressed in the steel cell and that the plug let go easy when de-mounting the plug after the test.
6. A 100-150 mm long soft plastic tube for conveying percolated water from the specimens to the measuring vessels during the leaching test is mounted onto the outlet nipple on the bottom lid of each test cell.
7. The steel cylinder with the plastic plug and specimen is placed with its upstream end on the upstream steel lid with an o-ring between.
8. A small steel ring with an opening is placed on the downstream end of the specimen, preventing the specimen to slide out of the plastic plug during the test later on.
9. An o-ring is mounted on the downstream end of the steel cylinder.

10. The test cell is filled with (deionised?) water up to the level of the o-ring. This is done to avoid air in contact with the specimen.
11. The downstream lid is mounted and the cell is assembled by a number of steel bolts. Regard to risk for cracking of the specimen must be made when the bolts are screwed.
12. The inlet tube from the pressurizing side is fixed to the top-lid and the water pressure is applied by use of the shutoff valve.
13. Entrapped air is released through the air valve located on the upstream lid of the test cell.
14. The test cells are placed on their cylindrical surfaces.
15. The measuring vessels are connected to the soft plastic outlet tubes coming out from the test cells.
16. To prevent moisture leakage from the measuring vessels and CO₂ from coming in contact with the percolating water during the test, rubber plugs and balloons are mounted atop the vessels.

6.4 Procedure

The test is started by opening the shut-of-valves to the test cells. It is recommended to open the valves by care regarding the high water pressure that is used and the possibilities for leaks.

After the pressure is applied there shall be a rather quick response on the water flow. There can, however, be a number of reasons for a delay of the water:

- The specimen is not complete saturated with water.
- There can be entrapped air just downstream the specimen that can damp the flow. Take the test cell up and shake it upside down so air can be let out.
- The specimen is of very good quality, with low w/c-ratio and therefore very tight.

On the other hand the measured flow of water can be higher than the real at the start:

- If the specimen glides inside the plastic plug it will press out the volume of water between the specimen and the downstream lid into the measuring vessel and giving a wrong value of the flow.

Because there are possibilities that the flow will fluctuate at the beginning of the test, it is advisable that the measuring of the water flow is done often in the beginning of the test (approximately the first 5 hours) so it is observed when the steady state of flow is reached (should take about 3-12 hours). Observe that it is only the steady state flow that should be used when calculating the Darcian permeability.

The temperature shall not vary during the test, preferably it should be of $20 \pm 1^\circ\text{C}$. The viscosity, influencing the permeability, varies with temperature.

7 Validity

By validity is meant how valid the results are compared with a real concrete structure. There can be some differences between the permeability of test specimens and in real structures, for example by cause of:

- The size of the test specimens in the test method is much smaller than the most real structures. It is the same phenomena that exist in strength tests: in a large body of concrete there is a higher possibility of weak zones and cracks. Because the

permeability is approximately related to the diameter of flow channels raised to a power of 4, it is obvious that with the possibility of larger flow channels in larger bodies there is a possibility of higher permeability in real structures than in the test.

- The test method is mainly a test of one-dimensional flow of water. In reality water often may flow in more than one direction.

8 Reliability and source of errors

The repeatability, i.e. variation in test results when using the same batch of material, the same test equipment and the same personnel, seems to be good, roughly about 10%.

The reproducibility tells about the variation in test result using the same batch of material but not the same equipment, nor the same laboratory or personnel. Only one round-robin test has been conducted showing a rather bad result, approximately a difference of 2- 5 times. However, the measuring was not perfectly conducted – there were too few measures for each pressure level for some of the tests. In reality, the reproducibility should be better. Her ifrågasatte de att man kunde använda “good” för at godt är alltid i relation till något annat!!!

There can be some source of errors:

- Water leakage between the specimen and the plastic plug (or steel cylinder if the specimen is mounted direct in the cylinder). A suitable method to check if there is any leakage is to thread on a rubber balloon from the upstream end and mount the specimen again in the test cell and apply the pressure. If the flow of water now will cease to zero it can be assumed that there was no leakage between the specimen and the plastic plug and that all of the flow occurred through the specimen.
- Evaporation of water from the measuring vessels.
- Effect of air-filled pores in the specimen. In spite of performed water saturation, there might be air-filled pores that are trapped inside the specimen and that are filled with water first after a longer time.
- Air bubbles released in the specimen due to the gradually lowering of the water pressure in the specimen might decrease the permeability. Water, used in the testing as described her, is only in contact with air under ordinary atmospheric pressure. The water pressure is raised above atmospheric pressure by a pump and then returns again to atmospheric pressure when the water flows through the specimen. There should be no release of air bubbles inside the specimen because the pressure never dropping below the pressure of 1.0 atm at which the air was first dissolved.
- Hydration age: if the specimen is very young or the test last for a long time the concrete might hydrate and the permeability decreases.
- Swelling of the specimen: if the specimens are saturated no extra swelling should occur.
- Mechanical stresses and shrinkage in the specimen should be negligible in specimens older than 28 days.

9 Expression of results

When steady state flow of water is reached the permeability coefficient is calculated due to Darcy:

$$q_w = k_w \cdot \frac{dP_w}{L} \cdot A \quad (9.1)$$

or rewritten to

$$k_w = \frac{dP_w}{L} \cdot A / q_w \quad (9.2)$$

where q_w = water flow (m^3/s); k_w = permeability coefficient (m/s); dP_w = difference in pressure (m) between upstream and downstream end of the specimen; L = length of specimen (m); and A = cross section area (m^2).

10 Test report

The following information should be included in the test reported, if relevant

- a) Name and address of the test laboratory
- b) Date and identification number of the test report
- c) Name and address of the organisation or person who ordered the test
- d) Name and address of the manufacturer or supplier of the material or object tested
- e) Date of arrival of the material or object tested
- f) Description of the material or object tested, including sampling, composition, and curing age.
- g) Purpose of the test
- h) Test method
- i) Any deviation from the test method
- j) Name and address of the person who performed the test
- k) Date of the test
- l) Test results, including the specimen dimension
- m) Any observation of an abnormal permeability of the specimen during the test
- n) Any other comment on the specimen or the test
- o) Date and signature

ANNEX A: The test equipment

1 AQUISITION, BUILDING AND TESTING OF EQUIPMENT

1.1 Selection of equipment

Two sets of test rig are to be used in the project, one in Sweden, and the other in Iceland.

1.2 Description of the chosen equipment

The test rig accessible in Sweden is ready for use and is placed at Lund University, Faculty of Building Materials. It was built in 1997 for use in a doctoral project concerning leaching of cement concrete (Ekström 2003). The test kit accomplishes pressure up to 7-6 bars. It should be extended with conical test plugs in order to test cored cylindrical samples, if necessary.

The test rig placed in Iceland was built in 2003 and consists mainly of three parts:

1. The pressure part, comprising water cleaning kit, pump, pressurized water storage tank, and pressure reduction units.
2. Various plastic tubes, valves and fittings.
3. Six steel chambers, inside which the test samples are placed during the permeability testing.

Parts 1, 2 & 3 were manufactured in Sweden.

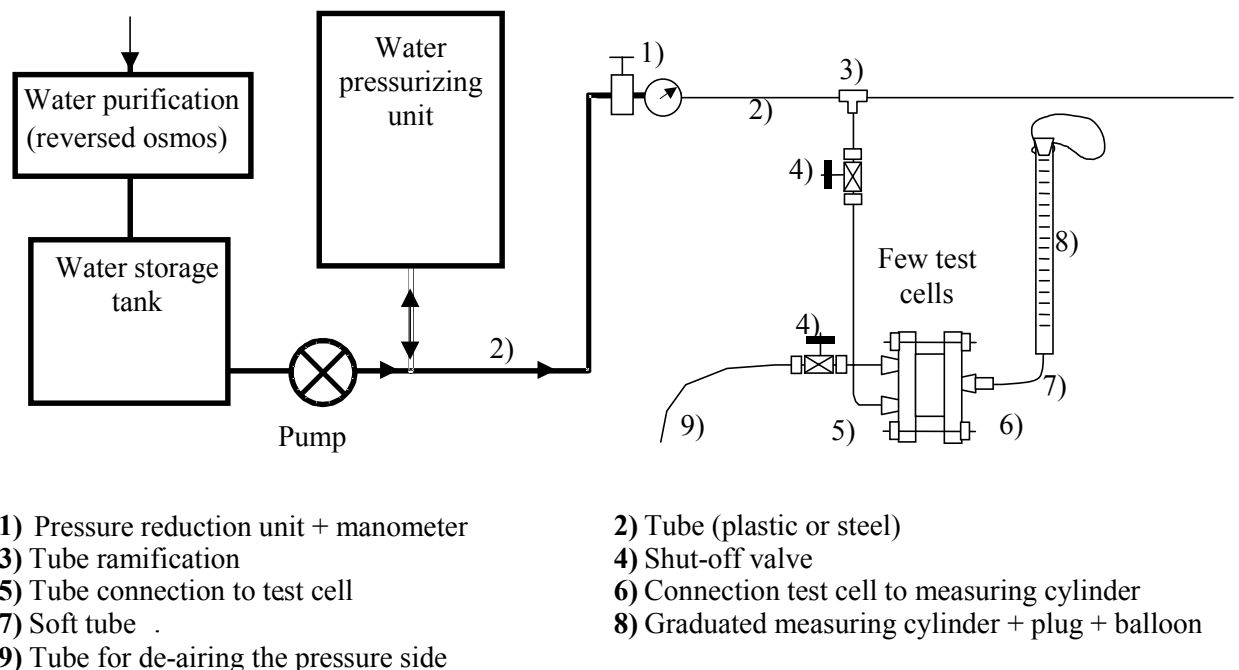


Fig. 1 Schematic figure showing the test rig at Lund University in Sweden as well as the other one which was built in Iceland in 2003.



Fig. 2 Photo of the test rig built in Sweden for delivery to Iceland, comprising water purifying part, pump, pressurized water storage tank and pressure reducing units.

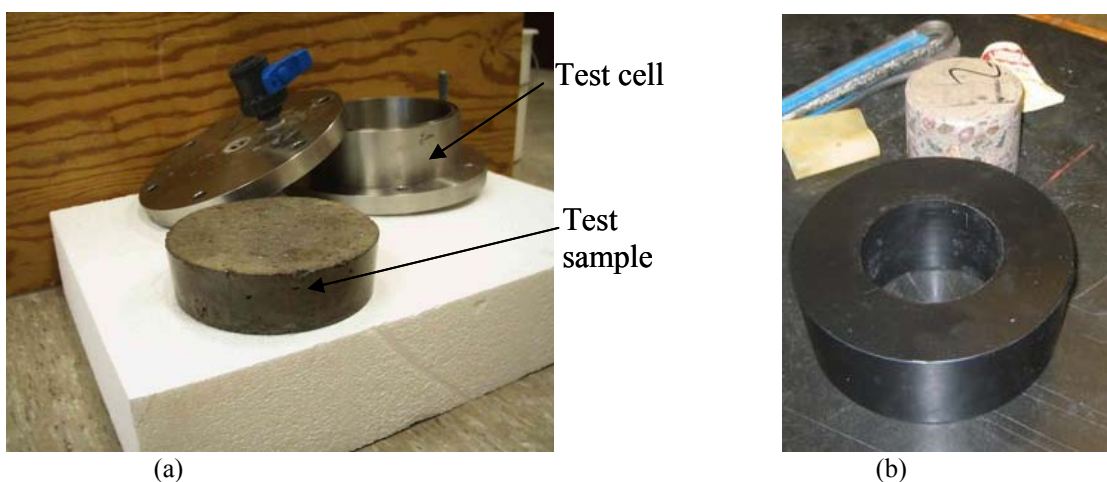


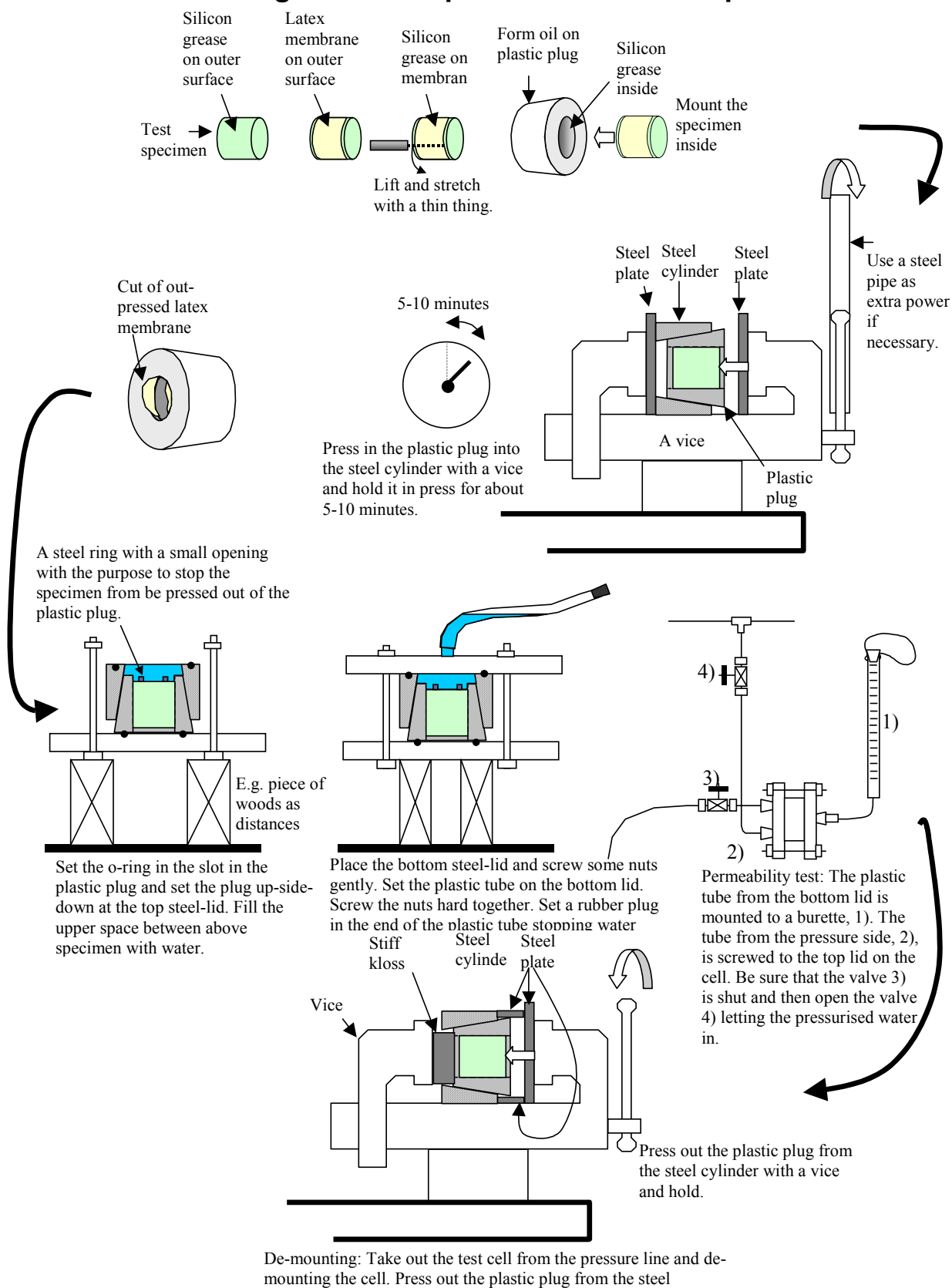
Fig.3 a) Test cell together with a concrete test sample cast in a conical form. b) Alternative with drilled test sample to be placed in plastic plug and then placed in test cell

As now, concrete test samples of following form and dimensions can be tested:

Table 1 Allowed sample sizes

	Conical samples, cast in the cells		Cored samples, cylindrical	
	Diameter, mm	Thickness, mm	Diameter, mm	Thickness, mm
Sweden	150	≤ 50	100	≤ 50
Iceland	150	≤ 90	100	≤ 90

ANNEX B: Mounting of drilled specimens – an example



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31

Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35

www.elforsk.se