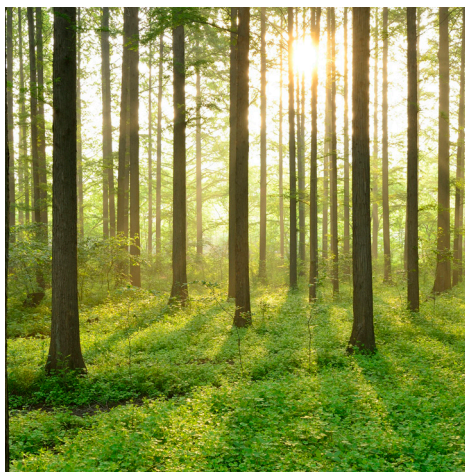


# UNDERSÖKNING AV INJEKTERAD BETONGS EGENSKAPER

RAPPORT 2021:811



 VATTENKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM  
VATTENKRAFT





# Undersökning av injekterad betongs egenskaper

PETER JOHANSSON  
MARTIN ROSENQVIST

ISBN 978-91-7673-811-5 | © Energiforsk Okt 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se



## Förord

**Injektering är en vanlig metod för att förlänga livslängden för konstruktioner med urlakad eller sprucken betong. Det är välkänt att injekterad betong får andra mekaniska och fysikaliska egenskaper än den ursprungliga betongen, men inte i vilken utsträckning de ändras eller vilka egenskaper som faktiskt erhålls. Det är dessutom troligt att det kan förekomma stor spridning i betongmaterialets egenskaper inom konstruktionen, beroende på hur injekteringsbruket sprids i konstruktionen.**

I detta projekt har utskovspelare i Hylte damm injekterats, och när sedan dammen revs ut i samband med att en ny damm byggts så togs betongstycken tillvara för att undersökas i laboratorium. Projektet har genomförts av professor Peter Johansson på Lunds tekniska högskola och seniorkonsult Martin Rosenqvist på AFRY. Studien ingår i Betongtekniskt program vattenkraft, som finansieras av Fortum Sverige, Jämtkraft, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Statkraft Sverige, Sydkraft Hydropower/Uniper, Tekniska Verken, Umeå Energi, Vattenfall Vattenkraft och Vattenfall Indalsälven.

Författarna vill passa på att rikta ett stort tack till Energiforsk som har finansierat denna laboratoriestudie. Den gynnsamma finansieringssituationen har möjliggjort att projektgruppen har getts möjligheten att utforma undersökningarna utan medverkan av särintressen. Vi vill också passa på att tacka för att projektiden har kunnat förlängas vilket har inneburit att det har varit möjligt att utveckla en ny mätmetod för registrering av vätskepermeabilitet.

### Arbetsgrupp

- Stefan Backe, Byggnadsmaterial, LTH
- Peter Johansson, Byggnadsmaterial, LTH
- Martin Rosenqvist, AFRY

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Sammanfattning

### Undersökning av injekterad betongs egenskaper

Under 2019 revs betongdammen i Hylte vilket gav unika möjligheter att undersöka betong från en tidig 1900-tals dammkonstruktion, det vill säga betong som varit exponerad för urlakning under cirka 100 år. Kort tid före rivningen injekterades en del av dammkonstruktionen med cementbaserat injekteringsbruk vilket var en betydelsefull förutsättning för denna studie. Detta eftersom ett viktigt syfte var att undersöka hur injektering påverkar dammbetongens materialegenskaper. Vidare var syftet också att undersöka inverkan av urlakning på betongens materialegenskaper.

I samband med rivningen togs provkroppar ut från dammen. Provkropparna var formade som rätblock med över- och underyta orienterade i plan med dammens horisontella gjutskarvar. Provkropparna transporterades till LTH:s laboratorium och ur dessa togs borrkärnor, orienterade dels vertikalt och del horisontellt i förhållande till dammens gjutriktning.

Inför laboratorieprovningarna okulärbesiktigades de uttagna betongcylindrarna och delades därefter in i tre huvudsakliga kategorier. Första indelningen gjordes avseende förekomst av urlakning eller oskadat prov och i nästa steg indelades de urlakade proven i två kategorier, med eller utan förekomst av injekteringsbruk. Samtliga provningsresultat var kopplade till denna kategorisering av proven samt också om de var uttagna i horisontell- eller vertikal orientering i förhållande till betongdammen. Vid laboratorieprovningarna mättes vätskepermeabilitet, spräckhållfasthet, tryckhållfasthet samt elasticitetsmodul (E-modul).

Laboratorieprovningarna visade att permeabilitetskoefficienten var markant högre för prov som hade synliga spår av urlakning jämfört med provserien utan urlakning. Mätningarna visade också att förekomst av injekteringsbruk inte hade någon inverkan på permeabilitetskoefficienten vilket kan betyda att en genomförd injektering inte leder till minskat vattenflöde genom en dammkonstruktion.

Spräckhållfastheten hos urlakad betong var i genomsnitt lägre jämfört med den oskadade betongen. Förekomsten av injektering hos den urlakade betongen visade endast på en marginellt högre spräckhållfasthet jämfört med fallet utan injekteringsbruk. Tryckhållfastheten hos den urlakade betongen var i genomsnitt lägre, cirka 50 %, jämfört med tryckhållfastheten hos den friska betongen. Vidare visade resultaten att förekomsten av injekteringsbruk inte höjde tryckhållfastheten.

En jämförelse av E-modulen mellan de olika kategorierna visar på små skillnader både mellan friska och urlakade prov samt mellan urlakade prov med och utan injektering. I genomsnitt uppvisade prov som tagits ut i dammens vertikala riktning högre hållfasthet och högre E-modul men samtidigt lägre permeabilitet, jämfört med prov uttagna i horisontell riktning. Orsaken bakom skillnaden bedöms vara dammens uppbyggd av stampbetong med horisontella gjutskarvar. Vidare visade samtliga provningar att förekomst av injektering hos de urlakade proven inte påverkade materialegenskaperna i nämnvärd omfattning jämfört med den urlakade betongen utan injekteringsbruk.

## Nyckelord

Betongdamm, betong, stampbetong, urlakning, injektering, materialegenskaper, permeabilitet, tryckhållfasthet, E-modul, spräckhållfasthet

## Summary

### Examination of grouted concrete properties

In 2019, the concrete dam in Hylte was demolished, which provided unique opportunities to examine concrete from an early 20th century dam construction, ie concrete that had been exposed to leaching for about 100 years. Shortly before the demolition, part of the dam structure was grouted with cement-based grout, which was an important prerequisite for this study. This, because an important purpose was to investigate how grouting affects the material properties. Furthermore, the purpose was to investigate the effect of leaching on the concrete.

In connection with the demolition, samples were taken from the dam. The samples were shaped as straight blocks with upper and lower surface oriented with the horizontal casting joints of the dam. The samples were then transported to LTH's laboratory and drill cores were taken out, oriented partly vertically and partly horizontally in relation to the dam.

Prior to the laboratory tests, the removed concrete cylinders were visually inspected and then divided into three main categories. The first division was made regarding the presence of cavities from leaching or not and in the next step the leached samples were divided into two categories, with or without the presence of grout. All test results were linked to this categorization as well as whether the samples (cylinders) were taken in a horizontal or vertical orientation in relation to the concrete dam. In the laboratory tests, liquid permeability, crack strength, compressive strength and modulus of elasticity (E-modulus) were measured.

The laboratory tests showed that the permeability coefficient was significantly higher for samples that had visible traces of leaching compared to the test series without leaching. The measurements also showed that the presence of grouting had no effect on the permeability coefficient, which may mean that grouting may not lead to reduced water flow through the dam.

The tensile splitting strength of leached concrete was on average lower compared to the undamaged concrete. The presence of grouting in the leached concrete showed only a marginally higher crack strength. The compressive strength of the leached concrete was on average lower, about 50%, compared to the compressive strength of the sound concrete. Furthermore, the results showed that the presence of grout did not increase the compressive strength.

A comparison of the E-module between the different categories shows small differences both between sound and leached samples and between leached samples with and without grouting. On average, samples taken in the vertical direction of the dam showed higher strength and higher E-modulus but at the same time lower permeability, compared with samples taken in the horizontal direction. The reason behind the difference is judged to be the dam's construction of stamped concrete with horizontal casting joints. Furthermore, all tests showed that the presence of grouting in the leached samples did not affect the material properties to a significant extent compared to leached concrete without grouting.



## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>8</b>
1.1	Provkroppar	8
1.2	Mätning av vätskepermeabilitet	15
1.3	Spräckhållfasthet	19
1.4	Tryckhållfasthet och E-modul	23
<b>2</b>	<b>Resultat</b>	<b>28</b>
2.1	Mätning av vätskepermeabilitet	28
2.2	Spräckhållfasthet	32
2.3	Tryckhållfasthet och E-modul	34
<b>3</b>	<b>Sammanfattning av resultat</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>Referenslista</b>	<b>37</b>

# 1 Inledning

Injektering är inom vattenkraften en vedertagen metod för att förlänga livslängden för konstruktioner med urlakad eller sprucken betong. Det är känt att injekterad betong får andra mekaniska och fysikaliska egenskaper än den ursprungliga betongen. Däremot är det inte känt i vilken utsträckning egenskaperna ändras eller vilka egenskaper som faktiskt erhålls. Det är dessutom troligt att det kan förekomma stor spridning i betongmaterialets egenskaper inom konstruktionen.

I en förstudie, utförd som en del av betongprogrammets ramprogram 2013–2016, undersöktes vid LTH (Avd. Konstruktionsteknik och Avd. Byggnadsmaterial) möjligheten att med dagens beräkningsprogram och modeller analysera injekterade konstruktioner med avseende på bärförmåga och täthet. Att kunna bedöma effekten av injektering är värdefullt när beslut ska fattas ifall en damm ska åtgärdas genom injektering, på annat sätt förstärkas eller ersättas med en ny.

I förstudien fastslogs det att dagens program och modeller är tillräckliga för att göra beräkningarna. Däremot konstaterades det att information och testresultat som visar materialegenskaperna för injekterad betong saknas. Baserat på förstudien presenterade LTH förslag på fortsatta studier. Resultaten från förstudien presenteras i sin helhet Åhs & Larsson (2016), se [1].

Under 2019 revs en betongdamm i Hylte vilket gav unika möjligheter att undersöka betong från en tidig 1900-tals dammkonstruktion, det vill säga betong som har varit exponerad för urlakning under cirka 100 år. Kort tid före rivningen injekterades en del av dammkonstruktionen med cementbaserat injekteringsbruk. Syftet med injekteringen var att möjliggöra jämförande studier av betongens materialegenskaper dels för den injekterade delen av dammen, dels för den utan injektering. Denna studie möjliggör inte enbart en jämförelse av materialegenskaper utan resultaten kommer att kunna användas för utvärdering av effektiviteten hos en genomförd injektering.

## 1.1 PROVKROPPAR

Dammen i Hylte var byggd av stampbetong, vilken lades ut i horisontella lager i form av gjutpallar, om 15–30 cm tjocklek, innan bearbetning. Därefter stampades betongen för hand. Tillvägagångssättet har gett upphov till generella svagheter i de horisontella gjutfogarna där sedermera genomsippande vatten har urlakat betongen över tid. Mer information om uppbyggnaden hos svenska betongdammar har beskrivits i en tidigare Energiforsk-rapport, se [2]. Uppbyggnaden av den aktuella betongdammen i Hylte samt injekteringen som genomfördes inför rivningen har beskrivits i Energiforsk-rapporten "Undersökning och rivning av Hylte betongdamm", se [3].

Provkropparna som togs ut från dammen var formade som rätblock där över- och underyta var orienterade i plan med dammens horisontella gjutfogar, se Figur 1. Uttagningen av provpropparna har beskrivits i en tidigare Energiforsk-rapport, se [3]. Betongblockens ungefärliga läge i dammen framgår av Figur 2. Provkropparna representerade såväl injekterade som ej injekterade delar av betongdammen.



Figur 1. Block som togs ut från Hylte betongdamm i samband med rivningen under 2019. Den ljusa överytan var orienterad som en horisontell gjutfog i betongdammen. Ytan närmast i bild var del av dammens uppströmssida med ett putsskikt ytterst.



Figur 2. Betongblockens ungefärliga position i betongdammen markeras av den röda ringen centralt i bilden.

Efter rivningen transporterades de tillvaratagna betongblocken till LTH utan fördröjning med syfte att blocken skulle kunna lagras i fuktig miljö fram till provningen. Under lagringen var blocken delvis nedsänkta i vattenbad och samtidigt övertäckta med plastfolie för att säkerställa att blocken som helhet inte tilläts torka ut under lagringen, se Figur 3. Om betongen tillätits torka ut före provningen skulle detta kunna innebära krympning och sprickbildning som följd eftersom betongen haft mycket höga fuktillstånd under dammens brukstid och sannolikt aldrig exponerats för uttorkning tidigare.



**Figur 3.** Efter rivningen av dammen lagrades de uttagna blocken på LTH delvis nedsänkta i vattenbad. För att förhindra uttorkning av betongen var vattenbaden täckta med plastfolie vilken säkerställde en lagringsmiljö med hög relativ fuktighet.

För provning av materialegenskaper borrades cylindrar med ytterdiametern 100 mm ut från blocken genom kärnbörning, se Figur 4. Borrkärnorna togs ut både horisontellt och vertikalt. Betydande delar av betongen uppvisade tydlig urlakning i de horisontella skikten invid skarvarna mellan gjutpallarna. Detta var troligtvis orsaken bakom att det var svårt att få ut ett tillräckligt stort antal sammanhållande cylindrar i horisontalled. Figur 5 visar borrhålet efter uttagningen av en horisontell borrkärna och borrhålets mantelyta visar långsgående sprickor som indikerar skarv mellan två gjutpallar. Borrkärnan som togs ut uppvisade en tydlig spricka som spår av den horisontella gjutskarven, se Figur 6. Vidare kunde borrkärnan enkelt delas i två delar utan motstånd, vilket sannolikt var ett resultat av urlakning längs gjutskarven. Injekteringsbruk som endast fyllde ut delar av det urlakade området noterades för samma borrkärna, se Figur 7.



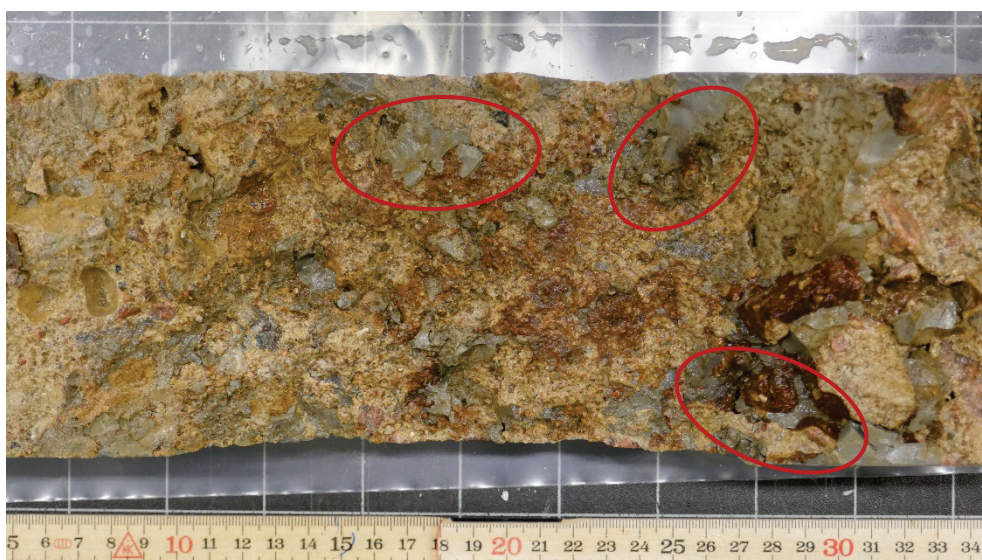
Figur 4. Betongblock med borrhål efter huvudsakligen horisontella borrhärnor.



Figur 5. Borrhål i betongblock efter uttagning av horisontell kärna. Den horisontella gjutfogen mellan två gjutpallar synlig som längsgående sprickor orienterade klockan 9 och 15.



Figur 6. Borrkärna uttagen i horisontell riktning genom gjutfogens plan och den horisontella sprickan sammanfaller med gjutfogen. Invid delar av sprickan påträffades injekteringsbruk som har markerats med ringar.



Figur 7. Borrkärnan enligt figur 5 delad i gjutfogssprickan. Ytan visar tydliga spår av urlakning samt fläckvis utfyllnad av injekteringsbruk som har markerats med ringar.

Vid kärnbörningen togs betongcylindrar ut med längder upp till cirka 500 mm och under nästa steg delades dessa genom sågning till cylindrar med längder om cirka 110 mm. Mellan de olika momenten lagrades proven i vattenbad och Figur 8 visar cylindrar med längden 110 mm lagrade i vattenbad.



Figur 8. Utborrade cylindrar med diameter 100 mm sågade till längden 110 mm lagrade i vattenbad i väntan på provning av materialegenskaper.

Efter sågningen av de cylindriska provkropparna till rätt längd med hänsyn till provningarna genomfördes okulärbesiktning med avseende på urlakning samt förekomst av injekteringsbruk. Med hänsyn till resultatet från okulärbesiktningen delades provkropparna in i kategorier 1–3 nedan och märktes enligt följande:

**1. F.V/H.XX**

Frisk provkropp. Vertikal alt. horisontell kärna. Provnummer

Urlakad provkropp. Utan injektering. Vertikal alt. horisontell kärna.  
Provnummer

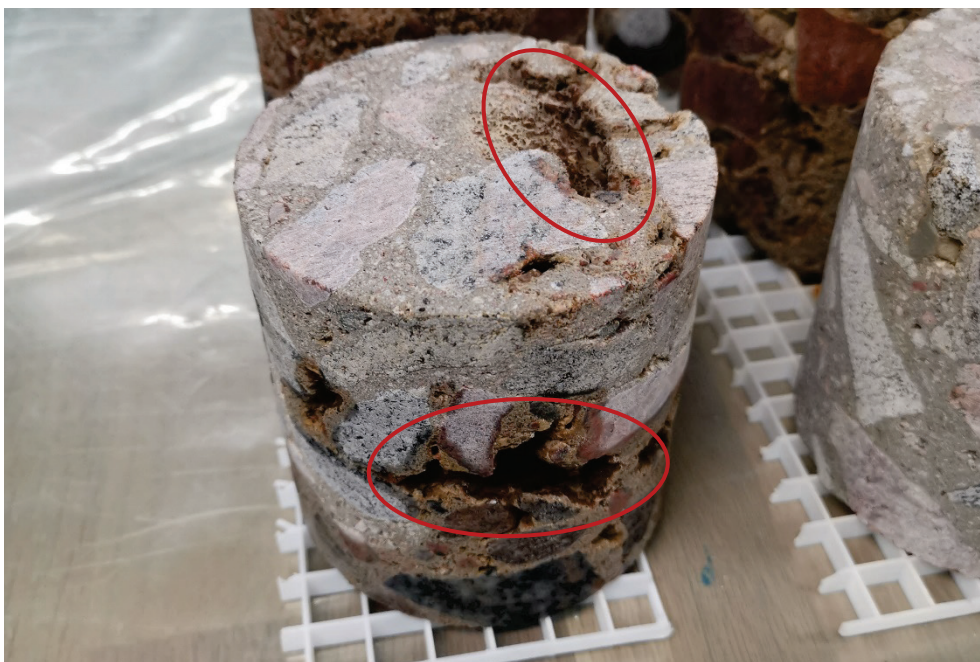
**3. U.M.V/H.XX**

Urlakad provkropp. Med injekteringsbruk. Vertikal alt horisontell kärna.  
Provnummer

Exempel på provkroppar i samband med okulärbesiktning ges i Figur 9 respektive Figur 10. Figur 9 visar en felfri provkropp utan sprickor eller tecken på urlakning medan Figur 10 visar en provkropp med tydliga spår av urlakning i form av hålrum. Provkropparna har också delats in beroende på dess orientering i dammen eftersom materialegenskaperna kan ha olika relevans beroende på riktning.



Figur 9. Provkropp utan visuella spår av urlakning, där fotografiet till vänster visar sågat snitt och fotografiet till höger mantelytan. Betongen sorterar under kategorin frisk provkropp.



Figur 10. Provkropp med tydliga spår av urlakning inom områden markerade med ringar. Inget injekteringsbruk syns. Betongen sorterar under kategorin urlakad provkropp utan injektering.



## 1.2 MÄTNING AV VÄTSKEPERMEABILITET

Mätning av vätskepermeabilitet genomfördes på cylindriska provkroppar med diametern 100 mm samt längden 110 mm. Provkropparna var indelade i tre kategorier enligt avsnitt 1.1 med avseende på förekomst av urlakningsskador samt synligt injekteringsbruk. Före provningen förseglades provkropparnas mantelyta med ett vätskebaserat tätskikt av fabrikat Ardex och variant P2D. För provkroppar med urlakningsskador på mantelytan kunde tätskiktet inte försegla den del av ytan där större skador fanns, se fotografiet till höger i Figur 11.

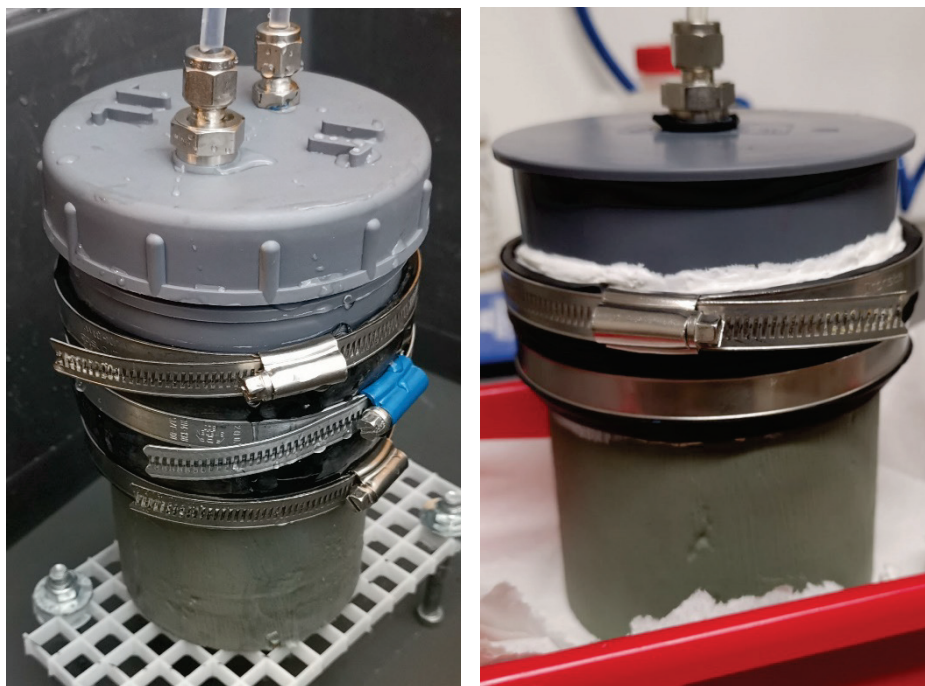


Figur 11. Provkroppar med förseglad mantelyta inför permeabilitetsmätning. Till vänster syns en frisk provkropp. Till höger syns provkroppen i Figur 10 med tydliga spår av urlakning, se markering med ringar.

När försöken inleddes saknades en färdigutvecklad metod för mätning av vätskepermeabilitet hos betongcylindrarna. Målsättningen var att kunna utvärdera de individuella cylindrarnas vätskepermeabilitet i cylindrarnas längdriktning under stationära flödesförhållanden. Ett stort antal förförsök genomfördes med syfte att identifiera en fungerande metod för permeabilitetsmätningar. Ett viktigt krav var att metoden skulle möjliggöra att en av cylindrarnas sågade yta skulle exponeras för ett kontrollerat vätsketryck under en längre tidsperiod utan läckage mellan provkropp och provningsutrustning. Det var också avgörande att vätskemängden som tillfördes provkropparna skulle kunna registreras löpande under mätningen.

För att kunna exponera den sågade ytan hos betongcylindrarna för vattentryck provades olika varianter av plastsocklar, ursprungligen avsedda för att plugga avloppsrör, se Figur 12. Som tätning mellan betongcylindrarna och plastsocklarna provades gummiduk av olika tjocklek alternativt gummipackningar avsedda för skarvning av VVS-rör. I vissa fall kompletterades gummipackningarna med

mjukfog. Packningarna fixerades mot plastsocklarna samt provens mantelyta med hjälp av slangklämmor. Oavsett vilket tätningsmaterial som provades mellan provkropp och plastsockel uppkom vattenläckage efter en viss tid och vi gjorde bedömningen att plastsocklarna saknade tillräcklig styvhet för att fungera som mothåll när slangklämmorna försågs med nödvändig spännkraft.



Figur 12. Provkroppar med förseglad mantelyta och två varianter av grå plastsockel applicerad för vätske-trycksättning av proven. Olika varianter av gummipackningar, ursprungligen avsedda för VVS-tillämpningar, monterades mellan proven och plastsockeln och fixerades med slangklämmor. I fotografiet till höger kompletterades gummipackningen med vit mjukfog.

Efter en serie försök med plastsocklar som hade monterats mot provproppen för trycksättning drogs slutsatsen att en gummipackning med lite större tjocklek, cirka 5–10 mm, fungerade som tätning tillsammans med slangklämmor. Emellertid fungerade inte plastsocklarna som tillräckligt mothåll mot slangklämmorna varför en sockel av aluminium tillverkades, se fotografi till vänster i Figur 13. För sockeln av aluminium utvärderades också olika varianter av packningar. Fotografi till höger i Figur 13 visar den slutliga uppställningen med aluminiumsockel samt tätning mellan sockel och provkropp bestående av en armerad kylarslang avsedd för lastbilmotor. Den armerade kylarslangen möjliggjorde att slangklämmorna kunde spännas tillräckligt hårt utan att slangen veckades, vilket var en orsak till vattenläckage hos flera av de tunnare och mjukare packningsmaterialen.



Figur 13. Provkroppar med förseglad mantelyta och sockel av aluminium applicerad för vätsketrycksättning av proven. De två fotografierna visar samma uppställning men med olika varianter av tätning mellan aluminiumsockel och provkropp. Tätning enligt fotografiet till höger, bestående av en armerad kylarslang avsedd för lastbilsmotor, fungerade väl och användes vid huvudförsöken. Blå pil i vänster fotografi visar vattenläckage genom mantelytan under trycksättning och röd ring visar anslutning för trycksättningsutrustning.

Metodutvecklingen resulterade i att permeabilitetsmätningarna genomfördes i enlighet med provuppställningen i höger fotografi i Figur 13. För att säkerställa att provkropparna var fixerade mot aluminiumsockeln användes två skruvtvingar som kan noteras i figuren. Utrymmet mellan aluminiumsockeln och provkroppens övre sågade yta försågs med vattentrycket 49 kPa vid samtliga provningar med hjälp av utrustningen enligt Figur 14. Utrustningen för trycksättning kopplades samman med aluminiumsockeln med en transparent plastslang. Under pågående permeabilitetsmätningar kontrollerades provkropparnas undersida, det vill säga nedströmssidan, avseende vätskegenomflöde och exempel på genomflöde i område med synlig urlakning enligt Figur 15.



Figur 14. Utrustning för trycksättning av provkroppar under permeabilitetsprovning.



Figur 15. Utflöde av vatten på provkroppens undersida genom urlakat område markerat med ring.

### 1.3 SPRÄCKHÅLLFASTHET

Mätning av betongens spräckhållfasthet genomfördes på cylindrar med mått enligt Tabell 1. Målsättningen var att genomföra så många provningar som möjligt på cylindrar som tagits ut med horisontell orientering eftersom egenskaperna i horisontell riktning bedömdes mest avgörande med avseende på vilken vidhäftning som kvarstår i skikten mellan gjutpallarna.

Eftersom det inte fanns ett tillräckligt stort antal intakta cylindrar som tagits ut i horisontell riktning genomfördes merparten av provningarna på vertikalt uttagna cylindrar. För provkategori 3 fanns det endast vertikala cylindrar att tillgå för provningen. Anledningen var dålig sammanhållning av cylindrarna.

**Tabell 1. Provkroppsbezeichnung samt mått för provkroppar till mätning av spräckhållfasthet. Provkropps-kategori enligt beskrivning avsnitt 1.1.**

Kategori	Provkropp	Längd [mm]	Diameter [mm]
1	F.H.02	110,5	104,3
	F.H.04	110,2	104,3
	F.H.06	110,8	104,3
	F.V.04	110,2	104,2
	F.V.05	110,0	104,2
	F.V.06	109,8	104,5
2	U.U.V.02	113,5	104,3
	U.U.V.04	113,1	104,4
	U.U.V.07	112,7	104,0
	U.U.V.10	110,1	104,5
	U.U.V.11	107,9	104,4
3	U.M.H.02	109,5	104,0
	U.M.H.03	110,4	104,0
	U.M.V.01	120,4	104,3
	U.M.V.03	121,8	104,3
	U.M.V.04	126,5	104,0

Mätning av spräckhållfastheten genomfördes med hjälp av en spräckrigg som var försedd med trubbiga egg, se Figur 16. För att jämna ut belastningen på grund av eventuella ojämnheter hos provkropparnas mantelyta monterades remsor av träfiberskiva med tjockleken 3 mm mellan spräckriggens egg och provkropparnas mantelyta. Vid provningen monterades spräckriggen i en provningsmaskin med vilken tryckbelastningen lades på med belastningsstyrning 1,55 kN per sekund. Provningsmaskinen kan ses i Figur 17.



Figur 16. Prov monterat i rigg för mätning av spräckhållfasthet. En träfiberskiva med tjockleken 3 mm monterades i kontaktpunkterna mellan provkropp och spräckrigg för lastutjämning mot eventuella ojämnheter hos betongcylinderns mantelyta.



Figur 17. Rigg för mätning av spräckhållfasthet hos prov enligt Tabell 1.

Figur 18 visar provkropp monterad i spräckriggen efter genomförd mätning av spräckhållfastheten. Efter genomförda mätningar påträffades en tydlig, vertikalt orienterad, spricka mellan riggens egg. De provkroppar som var horisontellt uttagna ur betongdammen (H) hade längsgående gjutfog/sprickplan orienterades så att dragspänningar i provkroppen hamnade tvärs sprickplanet. Övriga provkroppar gav någon form av referensvärde som de skadade provkropparnas värden kunde jämföras mot.



Figur 18. Betongcylinder med vertikal spricka efter genomfört spräckförsök.



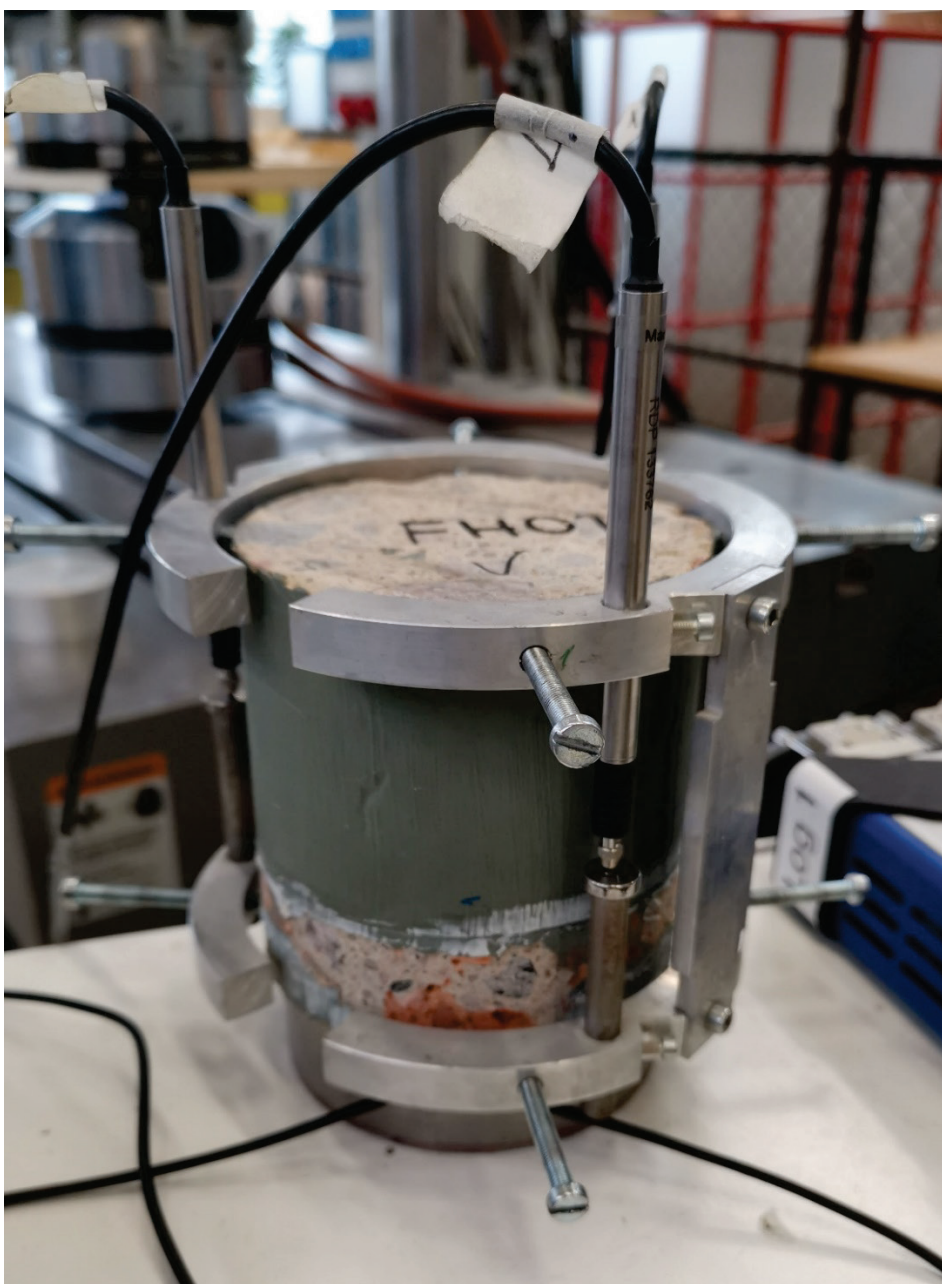
#### 1.4 TRYCKHÅLLFASTHET OCH E-MODUL

Mätning av betongens tryckhållfasthet och E-modul genomfördes för cylindrar med mått enligt Tabell 2. Merparten av provningarna gjordes på vertikalt uttagna provkroppar eftersom de som var horisontellt uttagna ur betongdammen hade längsgående gjutfog/sprickplan. Övriga provkroppar gav någon form av referensvärde som de skadade provkropparnas värden sedan kunde jämföras mot. För provkategori 2 fanns en horisontellt uttagen cylinder att prova medan för provkategori 3 fanns enbart vertikalt uttagna cylindrar att tillgå.

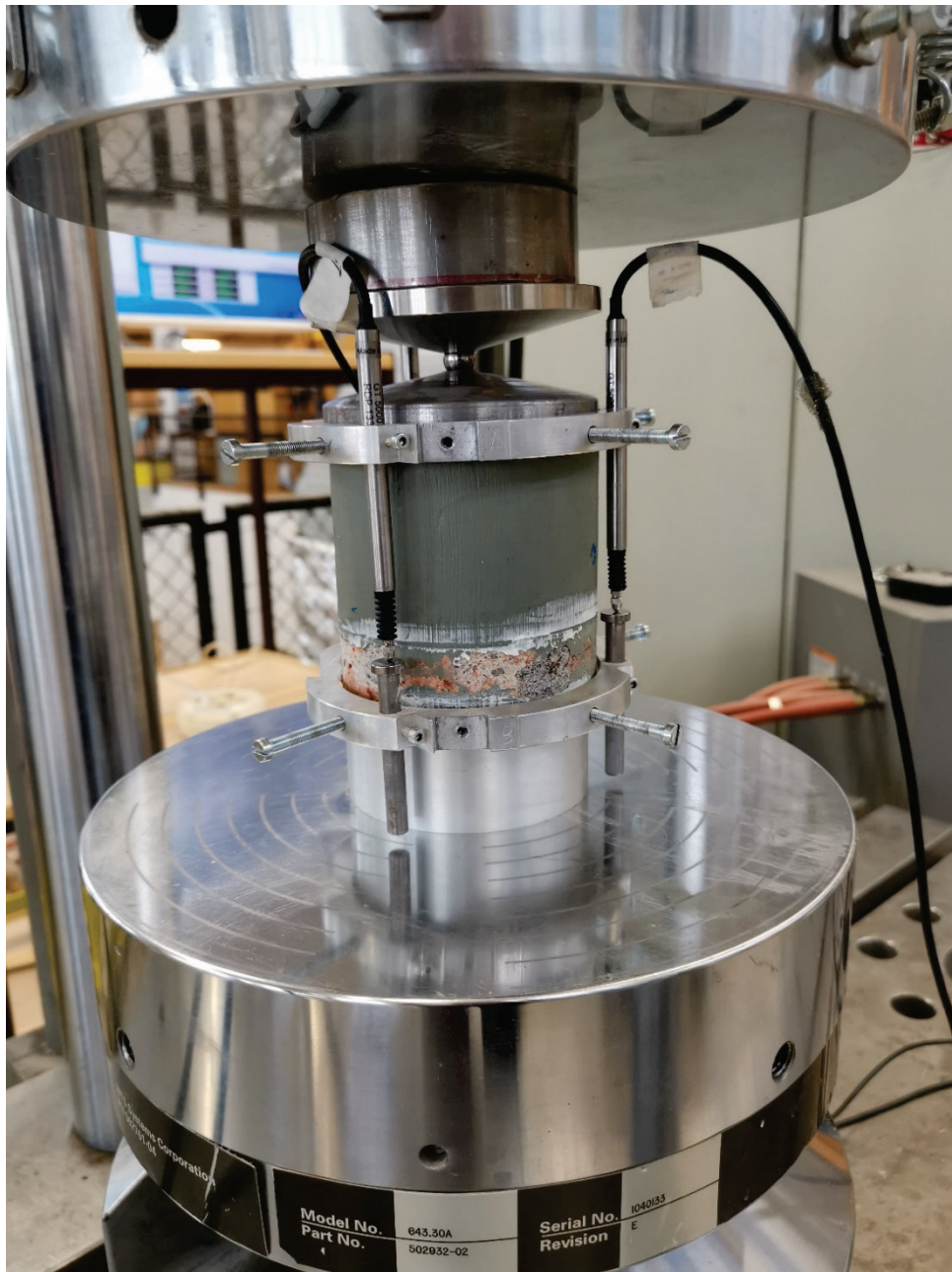
**Tabell 2. Provkroppsbezeichnung samt geometri för provkroppar till mätning av tryckhållfasthet och E-modul. Provkroppskategori enligt avsnitt 1.1.**

Kategori	Provkropp	Längd [mm]	Diameter [mm]
1	F.H.01	110	104
	F.H.03	110	104
	F.H.05	110	104
	F.V.01	113	104
	F.V.02	112	104
	F.V.03	111	104
2	U.U.V.01	108	104
	U.U.V.03	109	104
	U.U.V.06	109	104
	U.U.V.08	110	104
	U.U.V.09	110	104
3	U.M.H.01	111	104
	U.M.V.02	109	104
	U.M.V.05	110	104
	U.M.V.06_1	113	104
	U.M.V.06_2	113	104
	U.M.V.07	110	104

Försöken inleddes med mätning av E-modul på provkropparna. Lasten lades på med hastigheten 1,55 kN per sekund och töjningen registrerades genom en rigg med tre töjningsgivare, se Figur 19. Provkroppen med riggen för töjningsmätning placerades i tryckprovningssmaskin enligt Figur 20. Lasten ökades med angiven hastighet upp till maxbelastningen 100 kN, som motsvarade cirka 12,7 MPa för proven, och därefter togs lasten bort. Den maximala belastningen vid E-modulmätningarna valdes till cirka 60 % av betongens uppskattade tryckhållfasthet för att säkerställa deformationer i det elastiska spänningsområdet. Tryckhållfastheten uppskattades genom en förprovning av ett antal prov av samma serie.

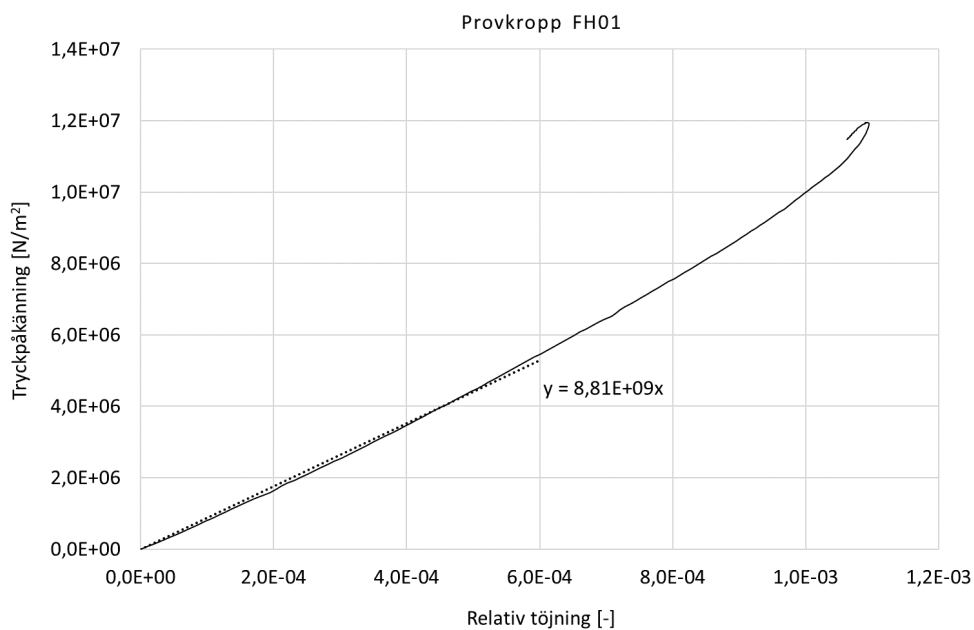


Figur 19. Betongcylinder monterad i rigg för registrering av töjning på tre sträckor längs mantelytan med LVDT-givare. Riggen användes vid mätning av E-modul.



Figur 20. Betongcylinder med töjningsrigg monterad i provningsmaskin inför provning av E-modul.

Från den första belastningen utvärderades provens E-modul och Figur 21 visar exempel på hur utvärderingen genomfördes för provkropp FH01. Grafen visar registrerade värden från provningen medan den prickade trendlinjen har lagts till för utvärdering av grafens riktningskoefficient, det vill säga provkroppens E-modul. Räta linjens ekvation för trendlinjen visas i Figur 21 som  $y = kx + m$  där  $m = 0$  eftersom trendlinjen startar i origo.



Figur 21. Tryckpåkning som funktion av relativ töjning vid mätning av E-modul för provkroppen med märkning FH01.

Efter avslutad mätning av provkropparnas E-modul mättes tryckhållfastheten på samma provkroppar med provningsmaskin (ALPHA 3-3000 AD, Form+Test), se Figur 22. Belastningshastigheten var 1,55 kN per sekund till brottlasten var uppnådd.

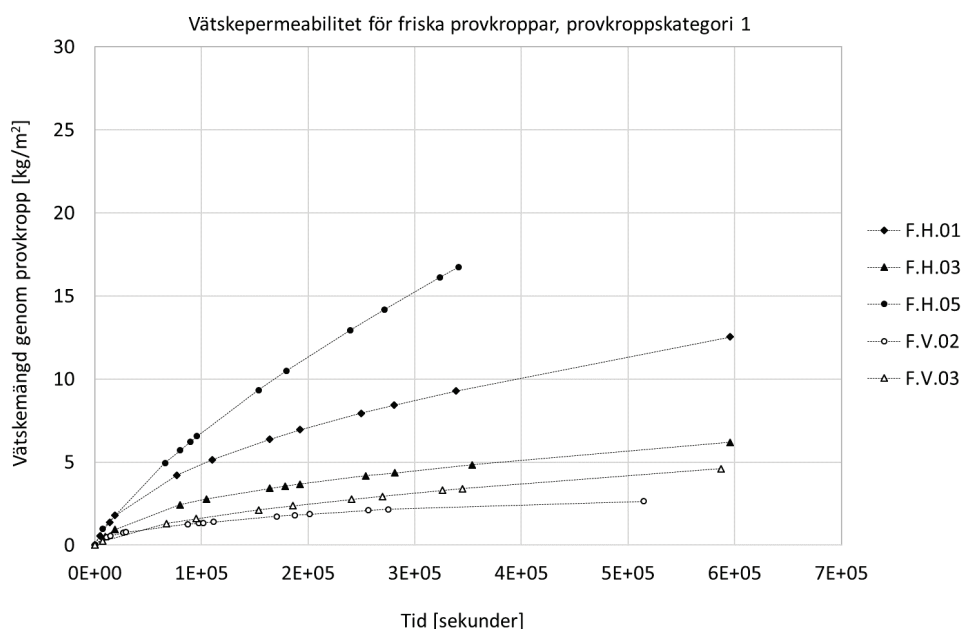


Figur 22. Betongcylinder monterad i provningsmaskin (ALPHA 3-3000 AD, Form+Test) inför provning av tryckhållfasthet.

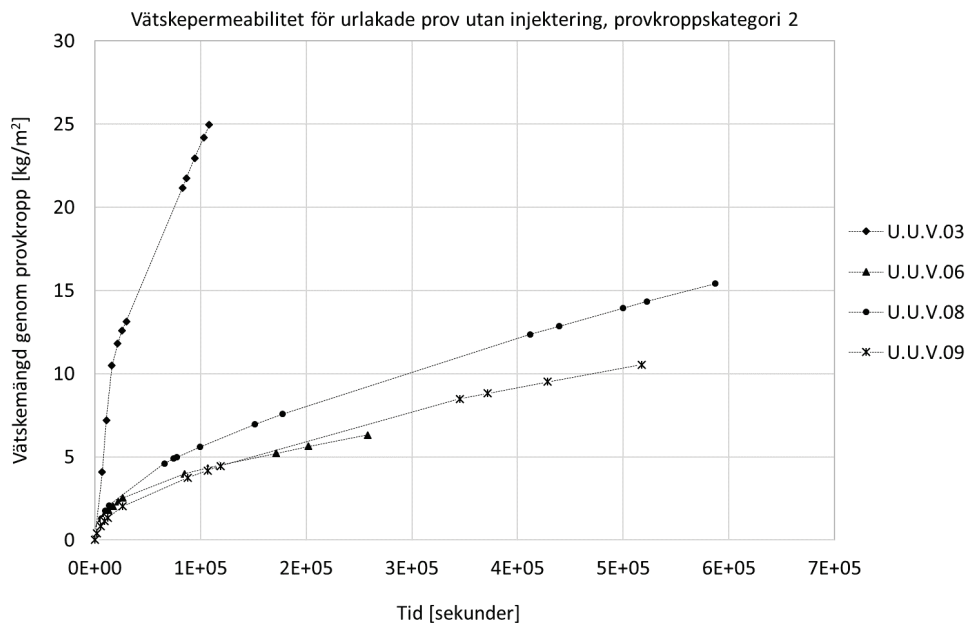
## 2 Resultat

### 2.1 MÄTNING AV VÄTSKEPERMEABILITET

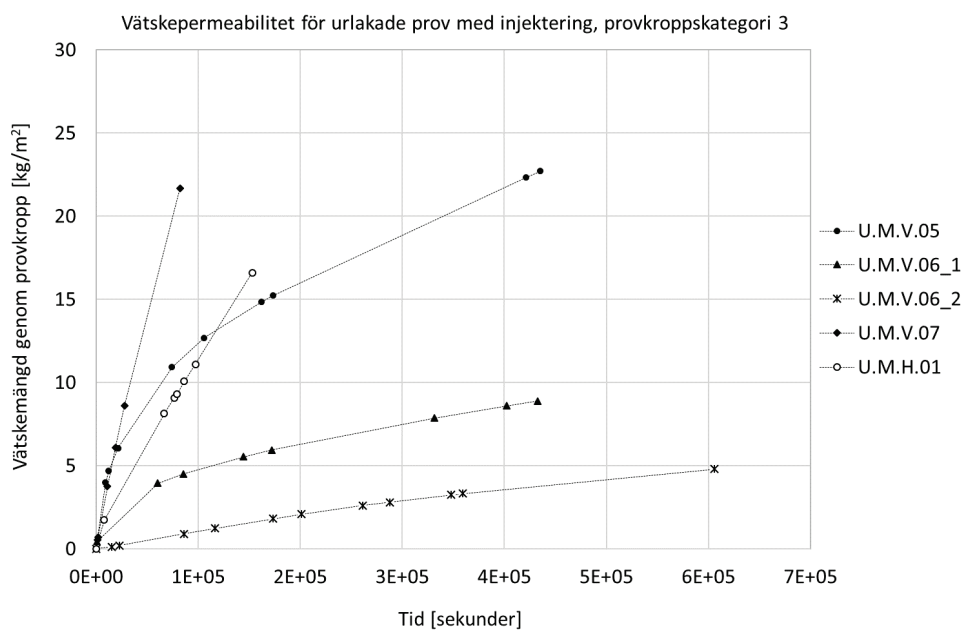
Resultat från mätningarna av vätskepermeabilitet utförda enligt avsnitt 1.2 för provkroppar indelade i tre huvudkategorier 1–3 enligt avsnitt 1.1. För samtliga provkroppar exponerades en av de två cirkulärt sågade ytorna för vattentrycket 49 kPa medan den andra sågade ytan exponerades för atmosfärstryck. Vattentrycket hölls konstant under hela försöket medan den totala vattenmängden som tillfördes provkroppen registrerades kontinuerligt. Figur 23 till och med Figur 24 visar total tillförd vattenmängd per exponerad ytenhet hos proven som funktion av tiden.



Figur 23. Vätskemängd som funktion av tid genom provkroppar utan synliga spår av urlakning. Provkroppsmärkning enligt avsnitt 1.1.



Figur 24. Vätskemängd som funktion av tid genom provkroppar med synliga spår av urlakning men utan injektering. Provkroppsmärkning enligt avsnitt 1.1.



Figur 25. Vätskemängd som funktion av tid genom provkroppar med synliga spår av urlakning samt synligt injekteringsbruk. Provkroppsmärkning enligt avsnitt 1.1.

Med hjälp av resultaten redovisade ovan beräknades permeabilitetskoefficienterna för respektive provkropp. Det stationära och endimensionella vätskeflödet  $g$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) som transporteras genom ett materialskikt på grund av ett yttre vattentryck kan beskrivas med ekvation 2.1 nedan.

$$g=(k\cdot P) /(\eta\cdot x) \quad (2.1)$$

där:

$g$  är vätskeflödet,  $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$

$k$  är permeabilitetskoefficienten,  $\text{kg}/\text{m}$

$P$  är vattentrycket Pa, (konstant 49 000 Pa vid mätningarna)

$\eta$  är vattnets dynamiska viskositet  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  (tabellvärde 0,001002  $\text{Pa}\cdot\text{s}$  vid 20°C)

$x$  är provets tjocklek (cylinderns längd), m

Genom att skriva om ekvation 2.1 till ekvation 2.2 kan permeabilitetskoefficienten beräknas där variablerna  $\eta$ ,  $x$  och  $P$  var samma för samtliga provkroppar. Ekvation 2.2 kan därför förenklas och skrivas som ekvation 2.3. Vätskeflödet  $g$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) beräknas för de individuella provkropparna genom minsta kvadratanpassning till de sista fyra punkterna i Figur 23–Figur 25 för respektive provkropp, det vill säga riktningskoefficienten baserad på de sista fyra mätpunkterna för respektive prov.

$$k=(g\cdot\eta\cdot x) /P \quad (2.2)$$

$$k=(g\cdot 0,001002\cdot 0,11) /49000 \quad (2.3)$$

Beräknad permeabilitetskoefficient  $k$  baserad på mätresultat redovisas för enskilda provkroppar samt medelvärde/representativt värde, markerat med fet stil, för respektive provkroppskategori, se tabell 3.

Resultaten presenterade i Tabell 3 visar att den genomsnittliga permeabilitetskoefficienten var cirka 10 gånger större för prov som hade synliga spår av urlakning jämfört med provserien utan urlakning. Förekomsten av synligt injekteringsbruk hos provkropparna med spår av urlakning förefaller ha obetydlig påverkan på den genomsnittliga permeabilitetskoefficienten. Generellt noterades en stor spridning i resultaten mellan de individuella provkropparna.



Tabell 3. Permeabilitetskoefficienter för individuella provkroppar samt medelvärde/representativt värde (fet stil) för respektive provkroppskategori enligt avsnitt 1.1. I kategori 2 endast vertikalt orienterade provkroppar.

Kategori	Provkropp	Permeabilitets- koefficient k, [kg/m]	Anmärkning
1	F.H.01	4,00E-14	Ok
	F.H.03	1,79E-14	Ok
	F.H.05	1,15E-13	Ok
	<b>F.H-medel</b>	<b>2,31E-13</b>	
	F.V.02	7,18E-15	Ok
	F.V.03	1,58E-14	Ok
	<b>F.V-medel</b>	<b>1,15E-14</b>	
2	U.U.V.03	4,55E-13	Tydligt utflöde genom botten
	U.U.V.06	4,01E-14	Mellanurlakning
	U.U.V.08	5,29E-14	Mellanurlakning
	U.U.V.09	3,64E-14	Lite urlakning
	<b>U.U.V-medel</b>	<b>1,46E-13</b>	
3	U.M.H.01	3,02E-13	Mkt urlakning + mkt bruk
	<b>U.M.H</b>	<b>3,02E-13</b>	
	U.M.V.05	8,81E-14	Lite urlakning + lite bruk
	U.M.V.06_1	3,50E-14	Lite urlakning + lite bruk
	U.M.V.06_2	1,89E-14	Lite urlakning + lite bruk
	U.M.V.07	7,63E-13	Tydligt utflöde genom botten
	<b>U.M.V-medel</b>	<b>2,26E-13</b>	

## 2.2 SPRÄCKHÅLLFASTHET

Spräckhållfastheten  $f_{cr}$  (MPa) beräknades enligt SS-EN 12 390–6:2009 och beskrivs med ekvation 2.4 nedan.

$$f_{cr} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (2.4)$$

där:

F är spräckhållfastheten, N

L är provkroppens kontaktlinjes längd, mm

d är angivna tvärsnittsmått (provkroppens diameter), mm

I Tabell 4 redovisas spräckhållfastheten för individuella provkroppar, dels som maximal last, dels som maximal spänning före spräckbrott. Maximal belastning räknades om med hjälp av ekvation 2.4 samt provkropparnas individuella längd och bredd enligt Tabell 1. Förutom individuella värden redovisas medelvärde (fet stil) för respektive provkroppskategori.

En jämförelse av maximala spänningen vid spräckbrott för de olika provkroppskategorierna visar på små skillnader. För provkroppskategori 1 som representerar felfria provkroppar var den sammanvägda spräckhållfastheten något högre jämfört med provkroppar från kategori 2–3 som var urlakade. För de felfria provkropparna var det tydligt att vertikala provkroppar hade högre spräckhållfasthet jämfört med de horisontella. En möjlig förklaring till skillnaden kan vara att de vertikala provkropparna tagits ut mellan dammens gjutfogar och således varit opåverkade av dessa medan områden med gjutfogar sannolikt har funnits med i de horisontellt uttagna cylindrarna.

Vid jämförelse av spräckhållfastheten för provkroppar från kategori 2–3, det vill säga urlakade provkroppar med eller utan injekteringsbruk, observerades endast små skillnader. För urlakade provkroppar med injekteringsbruk fanns både vertikala och horisontella kärnor representerade medan för urlakade utan injektering fanns endast vertikala kärnor. Avsaknaden av horisontella kärnor begränsar möjligheten att utvärdera injekteringsbrukets inverkan på spräckhållfastheten.

Om resultaten från de vertikala kärnorna beaktas kan man emellertid dra slutsatsen att förekomst av urlakning tydligt minskar betongens spräckhållfasthet jämfört med oskadad betong. Vidare kan man dra slutsatsen att förekomsten av injekteringsbruk inte verkar ge en förbättrad spräckhållfasthet för de urlakade proven.

Tabell 4. Spräckhållfasthet för individuella provkroppar samt medelvärde/representativt värde (fet stil) för respektive provkroppskategori enligt avsnitt 1.1. I kategori 3 endast vertikalt orienterade provkroppar.

Kategori	Provkropp	Spräckhållfasthet [N]	Spräckhållfasthet [MPa]	
1	F.H.02	3,17E+04	1,75	
	F.H.04	2,20E+04	1,22	
	F.H.06	3,22E+04	1,77	
	<b>F.H-medel</b>		<b>1,58</b>	
	F.V.04	3,75E+04	2,08	
	F.V.05	5,02E+04	2,79	
	F.V.06	4,57E+04	2,54	
	<b>F.V-medel</b>		<b>2,47</b>	
2	U.U.V.02	2,66E+04	1,43	
	U.U.V.04	2,51E+04	1,35	
	U.U.V.07	3,45E+04	1,87	
	U.U.V.10	3,30E+04	1,83	
	U.U.V.11	2,68E+04	1,51	
	<b>U.U.V-medel</b>		<b>1,60</b>	
3	U.M.H.02	2,18E+04	1,22	
	U.M.H.03	2,95E+04	1,64	
	<b>U.M.H-medel</b>		<b>1,43</b>	
	U.M.V.01	2,18E+04	1,10	
	U.M.V.03	2,91E+04	1,46	
	U.M.V.04	2,36E+04	1,14	
	<b>U.M.V-medel</b>		<b>1,24</b>	

### 2.3 TRYCKHÅLLFASTHET OCH E-MODUL

I Tabell 5 redovisas tryckhållfasthet och E-modul för individuella provkroppar. Tryckhållfastheten redovisas både som maximal last och som maximal spänning före brott. Mätningar av tryckhållfasthet och E-modul genomfördes på samma provkroppar och beskrivning av mätningarnas genomförande samt utvärdering redovisas i avsnitt 1.4. Utvärdering av E-modulen kunde inte genomföras för samtliga provkroppar, se anmärkningar i Tabell 5.

För provkropparna utan spår av urlakning, kategori 1, fanns tillräckligt med prov av både vertikal och horisontell orientering för en jämförelse. För urlakade prov, kategori 2–3, fanns det emellertid enbart vertikalt orienterade prov med ett undantag inom kategori 2. Bristen på horisontellt orienterade provkroppar orsakades av att dessa ofta sönderdelades i samband med kärnborrningen, se avsnitt 1.1.

Vid jämförelse av resultaten i Tabell 5 framkommer att genomsnittlig tryckhållfasthet för provkroppar utan spår av urlakning var tydligt högre jämfört med provkroppar i kategori 2–3 som uppvisade spår av urlakning. I genomsnitt hade provkropparna utan urlakning cirka 30 MPa som tryckhållfasthet medan motsvarande värde var cirka 20 MPa för de urlakade provkropparna. För provkropparna utan urlakning, med både vertikala och horisontella kärnor, var den genomsnittliga tryckhållfastheten något högre för de vertikala kärnorna vilket var förväntat. Detta eftersom försvagningar på grund av att horisontella gjutskarvar inte påverkar proven med vertikal orientering.

För den urlakade betongen, kategori 2–3, fanns endast ett prov med horisontell orientering vilket innebär att en jämförelse av egenskaper inte kan göras mellan de båda riktningarna. En jämförelse av tryckhållfastheten hos de vertikala och tillika urlakade proven visade att förekomsten av injekteringsbruk inte inverkar på tryckhållfastheten. Det förefaller som om den genomförda injekteringen inte har bidragit till ökad tryckhållfasthet.

En jämförelse av E-modulen mellan de olika kategorierna visar på små skillnader både mellan friska och urlakade prov samt mellan urlakade prov med och utan injektering. För frisk betong, kategori 1 enligt avsnitt 1.1, fanns det provkroppar med både horisontell och vertikal orientering varför E-modulen för dessa kan jämföras. Här kan man se att E-modulen är högre för prov med vertikal orientering på likande sätt som jämförelsen av tryckhållfasthet visade. Orsaken bakom skillnaden i E-modul mellan prov med horisontell respektive vertikal orientering är sannolikt att de horisontella proven delvis var försvagade av gjutfogar.

Tabell 5. Tryckhållfasthet samt E-modul för individuella provkroppar samt medelvärde/representativt värde (fet stil) för respektive provkroppskategori enligt avsnitt 1.1.

Kategori	Provkropp	Tryckhållf. [N]	Tryckhållf. [MPa]	E-modul [GPa]	Anmärkning E-modul
1	F.H.01	2,05E+05	24,1	8,81	ok
	F.H.03	2,74E+05	32,3	13,9	ok
	F.H.05	2,14E+05	25,1	-	givare gled
	<b>F.H-medel</b>		<b>27,2</b>	<b>11,4</b>	
	F.V.01	2,37E+05	27,9	7,21	ok
	F.V.02	3,44E+05	40,5	21,7	ok
	F.V.03	2,54E+05	29,9	17,8	ok
	<b>F.V-medel</b>		<b>32,8</b>	<b>15,6</b>	
2	U.U.V.01	1,58E+05	18,6	-	provades inte
	U.U.V.03	8,10E+04	9,54	-	provades inte
	U.U.V.06	1,61E+05	18,9	-	givare gled
	U.U.V.08	2,39E+05	28,2	20,0	ok
	U.U.V.09	2,09E+05	24,5	9,83	ok
	<b>U.U.V-medel</b>		<b>19,9</b>	<b>14,9</b>	
3	<b>U.M.H.01</b>	1,67E+05	<b>19,7</b>	<b>17,0</b>	ok
	U.M.V.02	-	-	-	brott vid 2E-2 MN
	U.M.V.05	1,42E+05	16,7	10,4	ok
	U.M.V.06_1	2,26E+05	26,6	7,66	ok
	U.M.V.06_2	2,02E+05	23,8	26,0	ok
	U.M.V.07	1,01E+05	11,9	-	ojämn kurva
	<b>U.M.V-medel</b>		<b>19,8</b>	<b>14,7</b>	

### 3 Sammanfattning av resultat

Vid mätning av betongens vätskepermeabilitet noterades stor spridning i resultat mellan individuella provproppar inom samma provkategori. I genomsnitt var permeabilitetskoefficienten cirka 10 gånger större för prov som hade synliga spår av urlakning jämfört med provserien utan urlakning. Förekomst av injekteringsbruk hos den urlakade betongen saknade inverkan på permeabilitetskoefficienten.

Spräckhållfastheten hos urlakad betong var i genomsnitt lägre jämfört med den oskadade betongen. Förekomsten av injekteringsbruk hos den urlakade betongen visade endast på en marginellt högre spräckhållfasthet jämfört med fallet utan injekteringsbruk.

Tryckhållfastheten hos den urlakade betongen var i genomsnitt lägre och uppgick till cirka 20 MPa, jämfört med tryckhållfastheten hos den friska betongen som i snitt var cirka 30 MPa. Vidare visade resultaten att förekomsten av injekteringsbruk inte höjde tryckhållfastheten. En jämförelse av E-modulen mellan de olika kategorierna visar på små skillnader både mellan friska och urlakade prov samt mellan urlakade prov med och utan injektering.

I genomsnitt uppvisade prov som tagits ut, orienterade i dammens vertikala riktning, högre tryckhållfasthet och högre E-modul men samtidigt lägre permeabilitet, jämfört prov uttagna i horisontell riktning. Orsaken bakom skillnaden bedöms vara dammens uppbyggd av stampbetong med horisontella gjutskarvar som ger upphov till läckvägar.

I denna studie var det svårt att identifiera en tydlig koppling mellan förekomst av injekteringsbruk hos den urlakade betongen och inverkan på betongens materialgenskaper. Erfarenhetsmässigt har det emellertid visat sig att injektering i betongdammar ofta leder till något reducerat läckage, vilket bromsar takten för pågående och skadlig nedbrytning. Motsvarande observation kunde inte göras med basis på den injekterade betongen i de utborrade cylindrarna.

## 4 Referenslista

- [1] Åhs M, Larsson O (2016) Injekterad betongs egenskaper – Konstruktionens bärförmåga och täthet, Rapport 2016:258, Energiforsk
- [2] Rosenqvist M. (2018) Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad, Rapport 2018:481, Energiforsk
- [3] Rosenqvist M. (2020) Undersökning och rivning av Hylte betongdamm, Rapport 2020:695, Energiforsk

# UNDERSÖKNING AV INJEKTERAD BETONGS EGENSKAPER

Under 2019 revs betongdammen i Hylte. Det ledde till unika möjligheter att undersöka betong från en dammkonstruktion från tidigt 1900-tal. Det vill säga betong som varit exponerad för urlakning under cirka 100 år. I samband med utrivningen tillvaratogs ett antal betongstycken för vidare undersökningar.

I rapporten redovisas resultaten från de efterföljande undersökningarna. Resultaten pekar på att det finns en tydlig koppling mellan vätskepermeabilitet och urlakningsskador hos betongen.

Injektering är en vanlig metod för att förlänga livslängden för konstruktioner med urlakad eller sprucken betong. Det är välkänt att injekterad betong får andra mekaniska och fysikaliska egenskaper än den ursprungliga betongen, men inte i vilken utsträckning de ändras eller vilka egenskaper som faktiskt erhålls.

Resultaten från Hylte visar att en injektering inte säkerställer att vätskepermeabiliteten reduceras utan resultaten tyder istället på att vätskepermeabiliteten förblir opåverkad efter injektering. Betongens mekaniska egenskaper undersöktes också och det framkom att spräck- och tryckhållfasthet var reducerad hos betong med urlakningsskador medan elasticitetsmodulen i stort var oförändrad. Injektering av den urlakade betongen visade inte på någon tydlig höjning av tryckhållfasthet och elasticitetsmodul medan spräckhållfastheten var något högre.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)