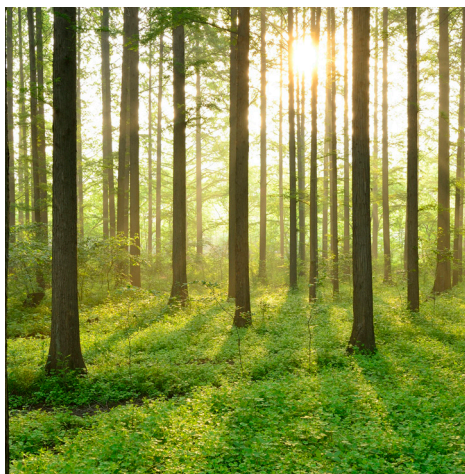


TRYCKBÄRANDE BORRHÅL FÖR HÖGTEMPERATURLAGER

RAPPORT 2020:667



Tryckbärande borrhål för högtemperaturlager

Sammanfattning

MAX HESSELBRANDT, JOSÉ ACUÑA OCH JOHAN FUNEHAG

ISBN 978-91-7673-667-8 | © Energiforsk April 2020

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

Förord

Lagring av höggradig värme över säsonger är eftersträvarsvärt för flera energibolag. Inte minst de som sommartid har en outnyttjad värmeresurs och vintertid har dyrare produktion att ersätta. Borrhålslager är i flera avseenden attraktiva för att fylla denna funktion men det finns utvecklingsbehov, bland annat av kostnadseffektiva kollektorlösningar anpassade till högre temperaturer. Detta projekt syftade till att undersöka öppna, tryckbärande borrhål med en koaxial kollektorkonfiguration anpassad till temperaturnivåer upp mot 100 °C.

Projektet Tryckbärande borrhål för högtemperaturlager har genomförts av ett projektteam lett av José Acuña, Bengt Dahlgren (löpnnummer 22331-02-1.0). Projektet har finansierats av, och ingår i, Energiforsks program Termiska Energilager som är ett forskning- och utvecklingsprogram vars långsiktiga mål är att visa hur, var och när termiska energilager kan utformas och användas och vilken ekonomisk och miljömässig nytta de kan ge. Det här är den svenska sammanfattning av projektets slutrapport Impermeable boreholes for high temperature thermal energy storage, Rapport 2020:666.

En fokusgrupp bestående av Henrik Lindståhl (Tekniska verken i Linköping AB), Morgan Romvall (Halmstad Energi och Miljö AB), Lennart Hjalmarsson (Göteborg Energi AB) och Mutaz Alkiswa (Öresundskraft Kraft & Värme AB) har följt och kvalitetssäkrat projektet.

Programmet Termiska lager leds av en styrgrupp bestående av Henrik Lindståhl (ordförande) (Tekniska verken i Linköping AB), Lennart Hjalmarsson (Göteborg Energi AB), Per Haker (Hässelholm Miljö AB), Einar Port (Mälarenergi AB), Per Kallner (Vattenfall R&D AB), Mutaz Alkiswa (Öresundskraft Kraft & Värme AB), Joacim Cederwall, (Jönköping Energi AB), Morgan Romvall (Halmstad Energi och Miljö AB), Ted Edén (Norrenergi AB), Fredrik Martinsson, Markus Wråke och Julia Kuylenstierna (adjungerade Energiforsk). Suppleanter har bestått av Ulf Hagman (Göteborg Energi), Marianne Allmyr, (Mälarenergi AB), Mile Elez (Tekniska verken i Linköping AB), Jesper Baaring (Öresundskraft Kraft & Värme AB), Mats Svensson (Halmstad Energi och Miljö AB), Staffan Stymne (Norrenergi AB), Patric Jönnervik (Jönköping Energi AB) och Erik Holmén (ENA Energi).

Stockholm, april 2020



Julia Kuylenstierna

Programansvarig Energiforsk

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

Författarens förord

Detta projekt blev en resa genom befintlig och ny kunskap, tillsammans med en projektgrupp som successivt omvandlades i takt med att forskningsfrågan och arbetsmetodiken i projektet blev närmare definierat.

Jag skulle vilja tacka några få personer som vid något tillfälle gjorde ett avgörande bidrag: Tony Jernström (Geobatteri AB), Stefan Swartling (Wassara), Johan Olovsson (BESAB) och Mikael Erlström (SGU). Era bidrag blev milstolpar i projektet!

Vi har tillsammans lyckats få ett bättre förståelse på hur grundvattnet kan strömma i geoenergiborrhål via sprickor och visat via avancerad injektering av lämpligt material att sprickorna kan tätas på ett kontrollerat sätt, dvs ett Tryckbärande Borrhål i ett borrhålslager är praktiskt möjligt, trots att det kräver omfattande insatser.

Tack till samtliga företag som finansierade denna forskning, och tack Fredrik Martinsson och Julia Kuylenstierna som på Energiforsk har lett forskningsprogrammet Termiska Energilager på ett ypperligt sätt.

Vi ses i nästa projekt!

José Acuña
Projektledare

Innehåll

1	Inledning	8
2	Bakgrund	9
3	Lokala förutsättningar, Distorp Linköping	12
4	Genomförande	16
5	Resultat	19
6	Diskussion och slutsats	22

1 Inledning

Denna rapport presenterar en detaljerad sammanfattning på svenska av ett forskningsprojekt som syftade till att undersöka möjligheten till att tillämpa injektering för att reducera eller förhindra utläckage av vatten i öppna, trycksatta borrhål avsedda för borrhålsvärmepåsar i högtemperaturborrhållager i hårt berg.

Ett primärt mål med projektet var att utveckla en designmetodik och procedur för genomförande av injektering samt av efterföljande hydrauliska mätningar för att undersöka hur effektiv tätning som uppnåtts genom injekteringsåtgärden. För detta syfte har teori kring samspelet mellan berg- och grundvattenförhållanden, injekteringsteknik och injekteringsmedlets egenskaper studerats.

Genomsläppligheten i hårt berg beror till största delen på karaktäristiken hos de sprickor som förekommer i bergmassan. Viktiga parametrar är bland annat sprickornas vidd (apertur), utbredning, orientering, spricktäthet samt i vilken grad sprickorna korsar varandra. Bergmatrikens genomsläpplighet till följd av porer och mikrosprickor är i regel försumbar i jämförelse med sprickornas genomsläpplighet, men är av betydelse för den maximala täthet som teoretiskt kan uppnås i berget.

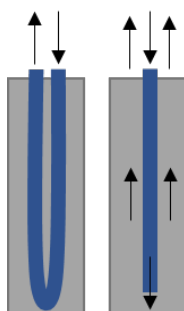
Vanliga mått på bergets genomsläpplighet och vattenförande förmåga är permeabilitet (m^2) respektive hydrauliska konduktivitet (m/s) och transmissivitet (m^2/s). Dessa kan bestämmas genom relationer mellan tryck och flöde som uppmätts under hydrauliska tester i borrhål. Den hydrauliska konduktiviteten hos sprickfritt, hårt berg kan vara så låg som 10^{-14} - 10^{-10} m/s , medan sprickigt berg typiskt kan uppvisa värden på uppemot 10^{-4} m/s .

Fältarbeten i två borrhål har utförts för att testa en ny framtagna injekteringsmetodik under praktiska förhållanden. Tätning av sprickor har utförts genom att under högt tryck pressa in ett injekteringsmedel i spricksystemet via borrhål, varpå ett medel härdar och bidrar till en tätare zon. Dessa försök föregicks av förundersökningar för kartläggning av de geologiska och hydrogeologiska förhållandena på platsen, vilka utgjorde underlag för planering och design inför fältinjekteringen.

2 Bakgrund

I dagsläget finns väletablerade tekniker för utvinning och lagring av värme och kyla via vertikala borrhål i berg. Vanligast är så kallade slutna system, i vilka köldbäraren cirkuleras i täta kollektorslangar i ett antal borrhål. Även öppna system där köldbäraren är i direkt kontakt med berget förekommer.

Borrhålskollektorer kan ha olika utföranden; i U-rörskonfiguration respektive koaxialkonfiguration enligt principer som visas i Figur 1. Bäst prestanda erhålls genom att tillämpa ett öppet system med borrhålsvärmväxlare i koaxialkonfiguration där den cirkulerande vätskan är i direkt kontakt med berget.



Figur 1. Borrhålsvärmväxlare i U-rörskonfiguration (vänster) samt koaxialkonfiguration (höger). Flödesriktningen i det senare kan ändras vid behov.

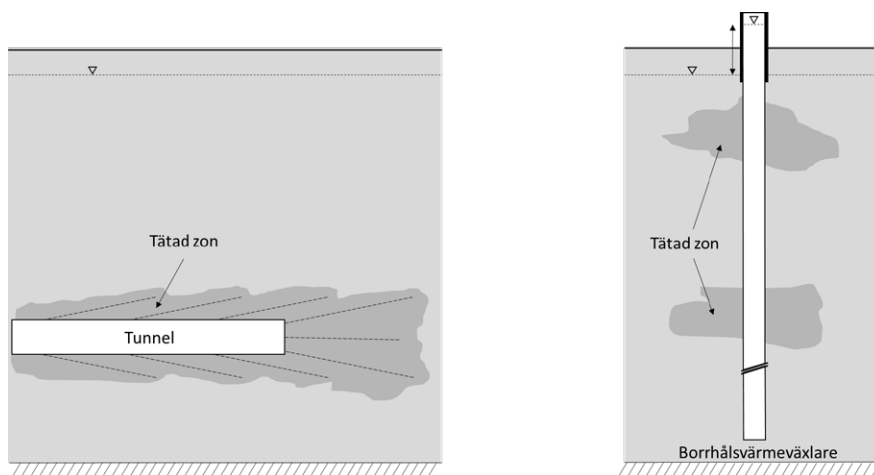
Genom att inlagra värmnet vid relativt höga temperaturer (uppemot 100 °C) skulle ett borrhålsvärmelager potentiellt kunna bistå vid fjärrvärmeproduktion, vilket fordrar små temperaturförluster i samband med värmväxling mellan köldbärare och berg.

Kristallint berg med låg genomsläpplighet i kombination med höga grundvattennivåer utgör goda förutsättningar för öppna system. Vid tillräckligt höga grundvattennivåer kan köldbäraren cirkuleras genom att åstadkomma ett undertryck på pumpens sug sida. Låga tryck ökar dock risken för kavitation eller kokning, vilket begränsar de möjliga temperaturnivåerna i systemet.

I det ideala fallet är berget så pass tätt att borrhålet i stället kan sättas under tryck utan att större läckage inträffar. I en bergmassa som består av magmatiska och metamorfa bergarter är den intakta bergmatrisen vanligen mycket tät, medan massans genomsläpplighet i huvudsak beror på sprickor som bildar ett vattenförande nätverk i berget. Detta innebär att en praktiskt taget ogenomsläpplig bergmassa kan erhållas under förutsättning att sprickorna som korsar borrhålet tätas i tillräcklig mån.

Tätning av sprickor genom så kallad injektering tillämpas bland annat inom tunnelbyggande för att reducera inflödet av grundvatten till tunneln, där det råder atmosfärstryck. Injekteringen utförs genom att under högt tryck pressa in ett injekteringsmedel i spricksystemet via borrhål, varpå medlet härdar och bidrar till en tätad zon runt tunnelns kontur.

Ett liknande tillvägagångssätt används i detta projekt för att möjliggöra tillämpningar av öppna koaxialvärmväxlare för lagring av värme. Till skillnad från vid tunnelinjektering syftar injekteringen till att tätta enskilda borrhål och därigenom minska läckaget från borrhålet då det trycksätts, se illustration i Figur 2.



Figur 2. Tätning av tunnel för reducering av inläckage samt tätning av ett borrhål avsett för högtemperaturlagring för reducering av utläckage.

För att uppnå ett fullgott resultat av de tätande åtgärderna krävs god kunskap om bergets spricknätverk såväl som egenskaperna hos de enskilda sprickor som skall injekteras. Vid injekteringsdesign är det brukligt att på ett förenklande sätt betrakta sprickorna som oberoende, planparallella spalter med en viss transmissivitet som svarar mot kubiken av spaltens vidd enligt den så kallade kubiska lagen. I regel är det inte möjligt att bestämma dessa parametrar fullt ut för varje enskild spricka. I stället används statistiska metoder för att uppskatta sannolikheten för förekomsten av en spricka med en viss sprickvidd. Dessa uppskattningar kan utföras om antalet sprickor samt transmissiviteter längs sektioner i ett borrhål är kända.

Sprickvidden hos de sprickor som skall tätas avgör vilket injekteringsmedel som är lämpligt att använda. I Sverige används huvudsakligen cementbaserade injekteringsmedel. Nackdelen med cementbaserade injekteringsmedel är dess begränsade inträngningsförmåga, d.v.s. att de inte kan tränga in i alltför trånga sprickor på grund av materialets relativt stora kornstorlek. En tumregel gör gällande att sprickor med aperturer mindre än $\sim 100 \mu\text{m}$ inte kan tätas med cementbruk.

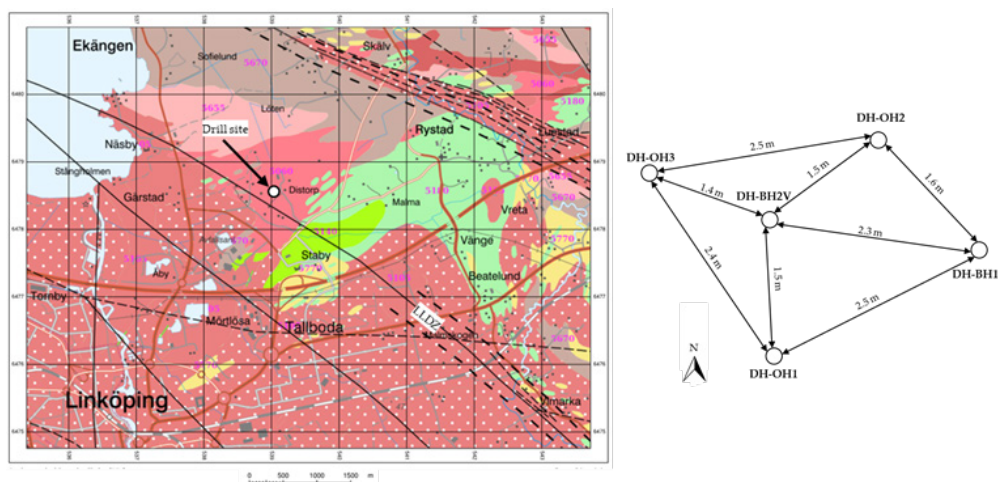
Användningen av icke cementbaserade injekteringsmedel är på grund av miljömässiga skäl mycket begränsad i Sverige, med undantag för kolloidal silika (silica sol) och polyuretan. Under fältarbetet i detta projekt användes silica sol för tätning av finare sprickor. Materialet består av nanopartiklar av amorf kisel i storleksordningen 5–100 nm lösta i vatten. När lösningen blandas med en accelerator (saltlösning) startar en gelningsprocess med påföljande hållfasthetsökning. Tiden för gelningsprocessen är möjlig att styra genom att variera andelen accelerator i blandningen. Inträngningsförmågan hos silica sol är mycket god; i fält har man kunnat visa att sprickvidder ned till $10 \mu\text{m}$ kan tätas

med silica sol. Sannolikt kan även mindre sprickor än så tätas med tanke på materialets fina partikelstorlekar.

3 Lokala förutsättningar, Distorp Linköping

Borrning och förundersökningar utfördes under år 2018 och 2019. Borrplatsen är belägen i Distorp Hagen, Linköping och har under tidigare projekt utsetts som en möjlig plats för ett storskaligt högtemperaturlager för säsongsviss lagring av värme från det närbelägna Gärstadsverket.

På platsen har två medeldjupa borrhål (DH-BH1L, DH-BH2V) samt tre grunda observationshål (DH-OH1, DH-OH2, DH-OH3) borrhats, se Figur 3. DH-BH1L är ca 300 m och borrades med luftdriven sänkborrhammare, medan vattendriven sänkborrhammare användes för borrning av DH-BH2V (ca 240 m) samt de 30 m djupa observationshålen.



Figur 3. Undersökningsplatsen utmarkerad på karta (vänster) samt borrhålens inbördes position på borrplatsen (höger).

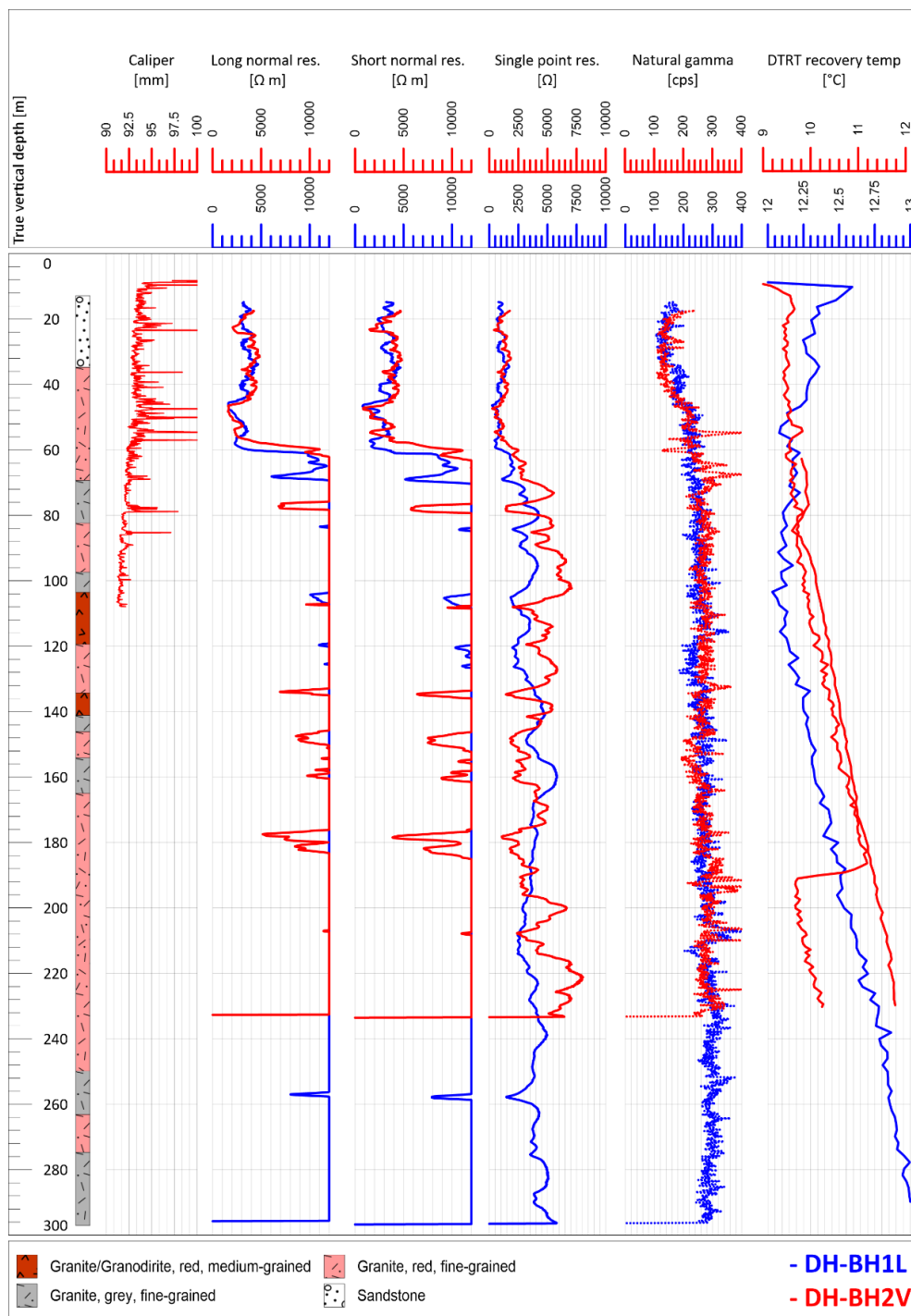
Under förundersökningsfasen utfördes termiska och hydrauliska tester i DH-BH1L och DH-BH2V. Dessutom har omfattande geofysiska mätningar utförts av Sveriges Geologiska Undersökning i båda borrhålen. De hydrauliska mätningarna utfördes i form av vattenförlustmätningar, under vilka vatten injekteras i avskärmade borrhålssektioner under konstant övertryck. Sektionens transmissivitet utvärderas utifrån det stabila flöde som erhålls i slutet av injekteringsperioden enligt

$$T_{Moye} = \frac{Q\rho_w g}{2\pi dp} \left[1 + \ln\left(\frac{L}{2r_b}\right) \right] \quad (1)$$

där Q och dp är uppmätt flöde och övertryck, ρ_w är vattnets densitet, g är tyngdaccelerationen, L är sektionens längd och r_b är borrhålets radie. Mätningarna utgjorde underlag för karaktärisering av berg- och grundvattenförhållandena på platsen. En sammanställning av ett urval av de geofysiska och termiska mätningarna presenteras i Figur 4.

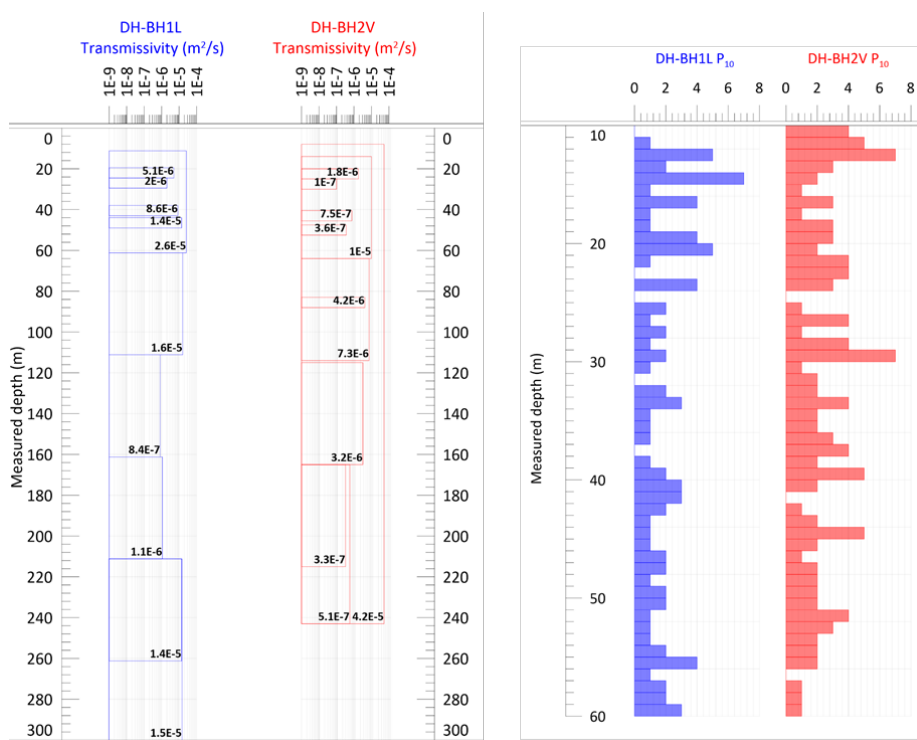
Av mätningarna framkom att spricktätheten och förekomsten av vattenförande sprickor är som högst i de översta ~60 m av respektive borrhål. På större djup är förekomsten av sprickor mer sporadisk. Resultaten visar på en minskande vattenförande förmåga utmed borrhålens djup, med undantag av de nedersta

intervallen i DH-BH1L där det sannolikt är en enskild, stor spricka som bidrar till den största delen av transmissiviteten i dessa (överlappande) intervall, se Figur 5. Medianen av de uppskattade sektionstransmissiviteter i DH-BH1L är $1.1\text{E-}05$ m^2/s samt $1.8\text{E-}06$ m^2/s i DH-BH2V.



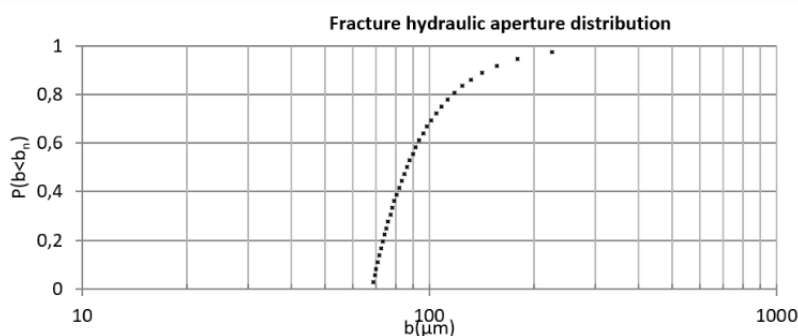
Figur 4. Bergarter, mekanisk kaliper, elektrisk resistivitet (long normal, short normal) och resistans (single point), naturlig gammastrålning, samt temperaturprofiler uppmätta med optisk fiber under återhämtningsfasen av termiska responstester.

Baserat på förundersökningarna beslutades det att injekteringsinsatserna skulle fokuseras till de översta 60 m av respektive borrhål, i stället för den ursprungliga planen där sektioner längs hela borrhålen var aktuella för injektering. I Figur 5 visas även en uppskattning av sprickintensiteter (antal sprickor per meter borrhål) i intervallet 10–60 m. Dessa har tolkats utifrån loggningar med så kallad acoustic televiewer (ATV), vilka används för att generera bilder av borrhålsväggen.



Figur 5. Transmissivitet uppskattade utifrån vattenförlustmätningar i DH-BH1L och DH-BH2V (vänster). Sprickintensitet, P_{10} (antal sprickor per meter), utifrån tolkning av loggar från akustisk televiewer i intervallet 10–60 m (höger).

De hydrauliska mätningarna och uppskattade sprickintensiteterna användes som underlag för att generera så kallade hydrauliska sprickviddsfördelningar (Figur 6).



Figur 6. Sannolika hydrauliska sprickvidder simulerade utifrån data från borrhål DH-BH1L.

Antalet sprickor är en känslig parameter i injekteringsdesign och här är denna bedömd som osäker. Detta eftersom öppna sprickor inte alltid kan urskiljas från t.ex. läkta, icke vattenförande sprickor utifrån ATV-loggar. För en mer noggrann kartläggning av spricksystemet kan bland annat tolkningar av borrhålskärningar ge

värdefull information, vilket inte har varit möjligt i detta fall. De beräknade fördelningarna kan i det här fallet ändå ge en indikation på storleken hos de sprickor som förekommer i intervallen som är aktuella för injektering. Sprickviddsfördelningarna användes därför som en utgångspunkt vid planering och upprättande av en basdesign inför fältförsöken.

4 Genomförande

I detta projekt utfördes injekteringen i borrhålssektioner som avskärmats med så kallade dubbelmanschetter. De uppblåsbara manchetterna tätar sektionens övre respektive nedre del så att samtligt flöde sker via sprickorna som korsar sektionen. Den injekteringsdesign som utvecklades inom projektet baseras på injekteringsmedlets inträngning (avståndet mellan borrhål och bruksplymens front) respektive hållfasthetstillväxt, för att uppfylla följande krav:

- Effektiv och beständig tätning av sprickor med sprickvidder i varierande storlek.
- Möjlighet att utföra efterföljande hydrauliska tester efter injektering, utan att behöva återborra den tätade sektionen i borrhålet.
- Snabb injekteringsprocess (inklusive hydrauliska tester) samt liten materialåtgång.

I praktiken innebär detta att det injekteringsmedel som kvarstår i sektionen efter injektering måste evakueras innan det har hunnit härda alltför mycket. Vidare skall det vara möjligt att utföra hydrauliska tester kort efter injektering.

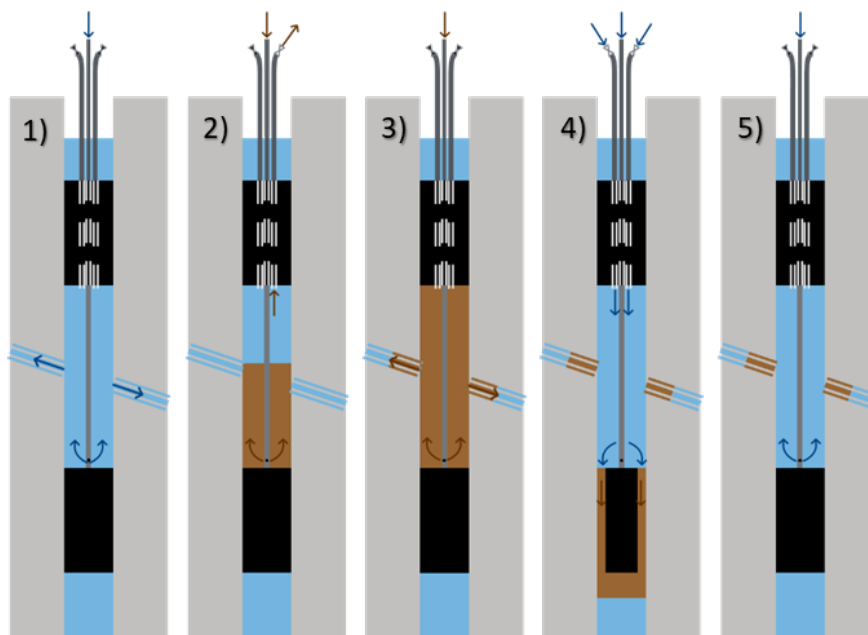
Kraven ovan kan inte uppfyllas inom t.ex. tunnelinjektering då borrhålen i vanliga fall inte tjänar något annat syfte än som injekteringshål. I den tänkta tillämpningen i detta fall måste borrhålen givetvis vara öppna efter ingreppet, och för att tidseffektivisera processen vid storskalig produktion bör resultatet snabbt kunna kontrolleras för att bedöma huruvida ominjektering krävs alternativt om injekteringen blivit lyckad. Detta innebär en utmaning då krafter som verkar under det påföljande hydrauliska testet riskerar att erodera bruket.

Med detta menas att bruket i sprickan upptar skjuvspänningar från vattnet till följd av tryckbelastningen i sektionen under det hydrauliska testet. Spänningens storlek beror på kombinationen av inträngningslängd, sektionstryck samt sprickvidd. Erosion kan förhindras genom att undvika att inducera spänningar som överskrider brukets skjuvhållfasthet. Både inträngningslängd, sektionstryck och brukets hållfasthetstillväxt är möjliga att beräkna, kontrollera eller mäta, varför dessa beaktas i designen för tätning av en spricka med given sprickvidd. Parametrar så som injekteringstryck, injekteringstid och injekteringsmedlets flödesegenskaper (viskositet, eventuell flytgräns för cementbaserade material) påverkar hur stor inträngning som erhålls under injekteringen.

Utförandet av injektering och hydrauliska tester kan kortfattat beskrivas enligt följande steg. Proceduren illustreras även schematiskt i Figur 7.

1. Utförande av hydrauliskt test innan injektering. Sektionstransmissiviteten utvärderas utifrån uppmätt flöde och tryck. Resultatet utgör underlag för bedömning av injekterbarhet, bruksval och injekteringsteknik.
2. Fyllning av injekteringsmedel i sektionen samt evakuering av vatten. Fyllningen utförs med lågt tryck och flöde för att reducera utspädning av bruket. Manchetterna är specialkonstruerade med evakuerings slangar mellan sektion och markyta för att möjliggöra observationer under fyllningsprocessen samt för provtagningar av bruk från sektionen.

3. Utförande av injektering med tryck och tid anpassade för att erhålla erforderlig inträngningslängd och skjuvhållfasthet hos injekteringsmaterialet i sprickan.
4. Nedre manschett släpps och injekteringsmaterialet evakueras från sektionen. Vatten spolas via injekterings- och evakuerings slangar.
5. Utförande av hydrauliskt test efter injektering. Resultatet ligger till grund för bedömning av erhållen täthet utifrån uppskattade transmissiviteter före respektive efter injekteringsinsatsen.

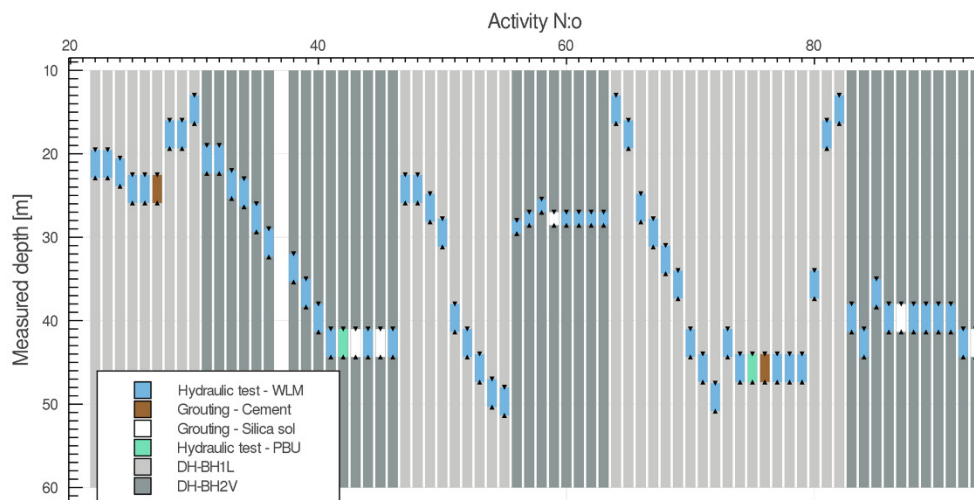


Figur 7. Schematisk bild av utförandet. Pilarnas färg och riktning indikerar material och flödets riktning. 1) Hydrauliskt test innan injektering. 2) Fyllning av injekteringsbruk och evakuering av vatten. 3) Injektering. 4) Evakuering av injekteringsbruk. 5) Hydrauliskt test efter injektering.

Fältarbetet utfördes under perioden 16 september – 3 oktober 2019. Arbetet innefattande hydrauliska tester och injekteringsförsök i borrhål DH-BH1L och DH-BH2V.

En kronologisk översikt över de utförda aktiviteterna visas i Figur 8. Figuren omfattar samtliga aktiviteter som utfördes inom intervallet 10–60 m i respektive borrhål, exklusive de hydrauliska tester som genomfördes under förundersökningsfasen. Utöver de injekteringsförsök som indikeras i Figur 8 utfördes även ett försök med injektering med cement i intervallet 83,00 – 86,35 m i DH-BH2V.

Totalt utfördes 8 injekteringsförsök i 6 olika sektioner, varav 3 injekteringar utfördes med cement och resterande med silica sol. En översikt över injekteringsinsatserna visas i Tabell 1. I tre av försöken kunde injektering och efterföljande vattenförlustmätning utföras i enlighet med det förfarande som beskrivs ovan, se Figur 7. Efter samtliga av dessa försök kunde en tätande effekt av injekteringsinsatsen observeras. I ytterligare ett fall observerades en tätande effekt genom kontrollmätning ca 5 dygn efter utförd injektering.



Figur 8. Översikt över aktiviteter som utfördes under fältarbetet under perioden 16 september-3 oktober 2019. Försöken innefattade vattenförlustmätningar (WLM), tryckuppbyggnadstest (PBU) samt injektering med cement respektive silica sol.

Tabell 1. Översikt över utförda injekteringsförsök.

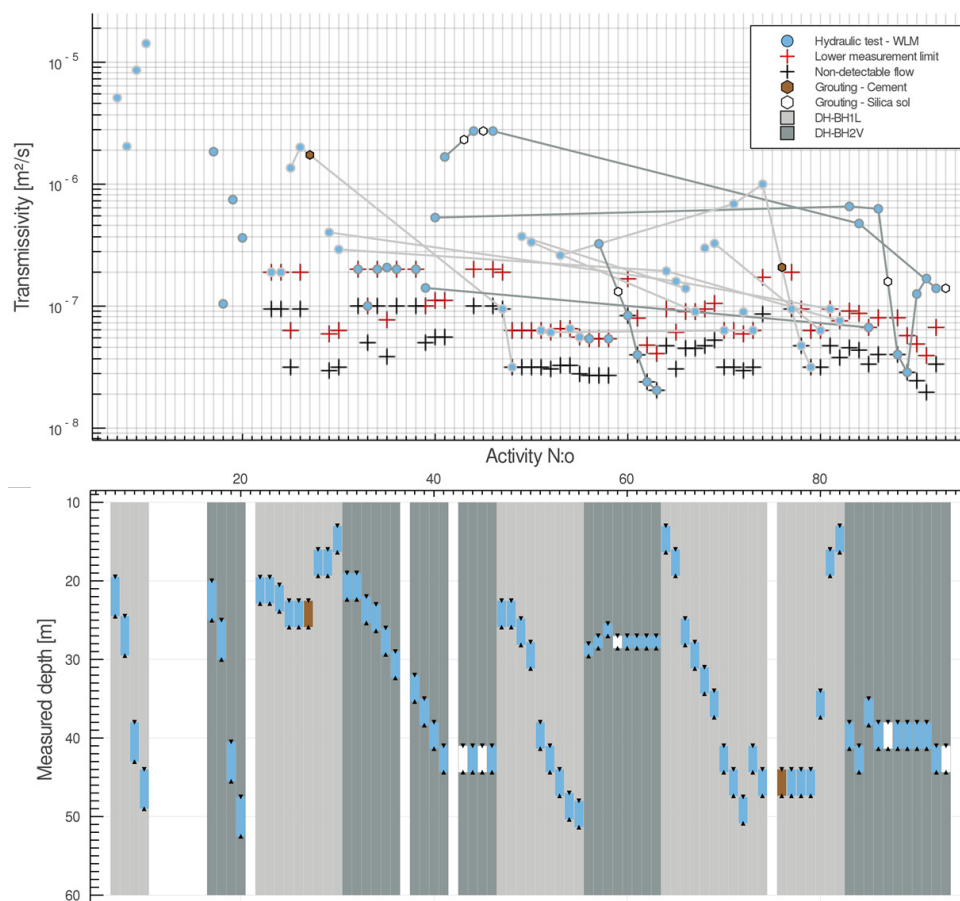
Datum	Borrhål ID	Sektion (m)	Bruk	Kommentar
2019-09-19	DH-BH1L	22,53–25,88 m	Cement	Efterföljande vattenförlustmätning kunde utföras först 2019-09-24, tätningseffekt observerad
2019-09-24	DH-BH2V	41,00–44,35 m	Silica sol	Försök 1, ingen gelning, ingen tätningseffekt observerad
2019-09-24	DH-BH2V	41,00–44,35 m	Silica sol	Försök 2, ingen gelning, ingen tätningseffekt observerad
2019-09-25	DH-BH2V	27,00–28,56 m	Silica sol	Tätningseffekt observerad
2019-09-30	DH-BH1L	44,00–47,35 m	Cement	Tätningseffekt observerad
2019-10-01	DH-BH2V	38,00–41,35 m	Silica sol	Tätningseffekt observerad
2019-10-01	DH-BH2V	41,00–44,35 m	Silica sol	Försök 3, avbrutet p.g.a pumphaveri
2019-10-02	DH-BH2V	83,00–86,35 m	Cement	Efterföljande vattenförlustmätning kunde inte utföras

Resterande försök betraktades som misslyckade. I fallen med silica sol-injektering noterades att gelningsförloppet inte fortgick enligt det som förväntats utifrån resultat från förprovningar, vilket senare kunde härledas till felande pumputrustning. I slutskedet av fältarbetet utfördes ett ofullbordat försök utan efterföljande vattenförlustmätning då tekniska problem med borrhålsutrustningen uppstod efter cementinjektering, varpå arbetet avslutades.

5 Resultat

Under fältarbetet i september-oktober 2019 utfördes totalt 63 vattenförlustmätningar i syfte att identifiera injekterbara sektioner samt för att kontrollera sektionernas täthet längs borrhålen före och efter injektingsinsatserna. Inverkan av injekteringsinsatserna kan undersökas genom att utföra mätningar i både injekterade sektioner och i sektioner nära de injekterade sektionerna. Eftersom borrhålen är tätt placerade relativt varandra finns möjligheten att en injekteringsinsats i det ena hålet även har en inverkan i det andra hålet om tätning sker av en eller flera sprickor som förbinder hålen hydrauliskt.

Samtliga resultat från vattenförlustmätningar utförda i intervallet 10–60 m i respektive borrhål presenteras i kronologisk ordning i Figur 9. Som referens visas även de resultat som erhöles genom mätningar i 5 m-sektioner under förundersökningsfasen. Samtliga mätningar har utvärderats enligt ekvation 1, se avsnitt 3.



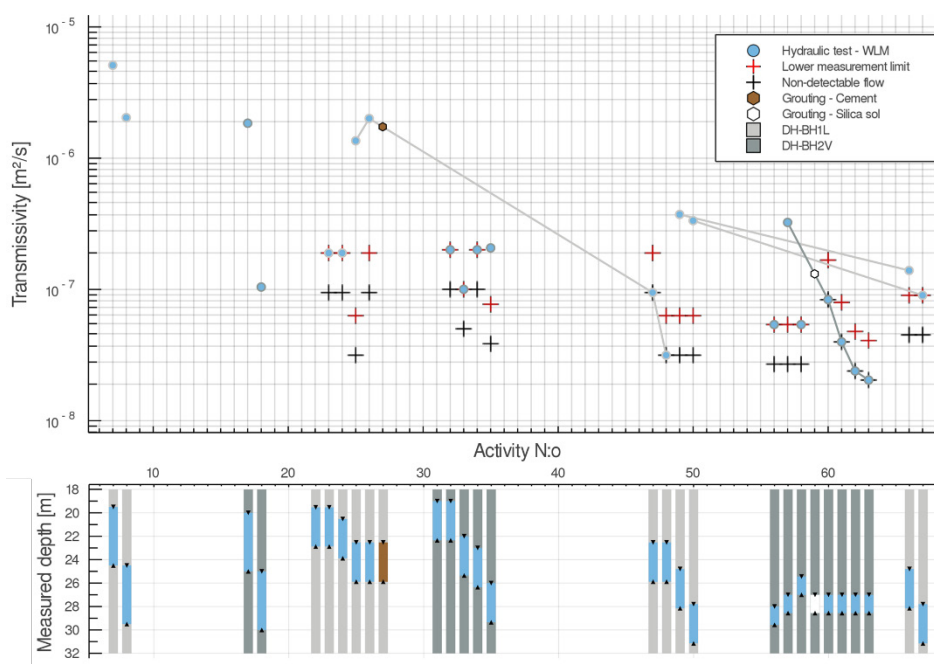
Figur 9. Översikt över resultat från utförda vattenförlustmätningar inom intervallet 10–60 m i DH-BH1L och DH-BH2V.

Vidare indikeras sektioner och borrhål i vilka mätningarna utfördes samt injekteringsinsatser som utfördes mellan testerna. Den nedre mätgränsen för

respektive mätning indikeras av röd symbol och beräknas utifrån det tryck som användes samt ett konstant flöde av 0,17 l/min med mätnoggrannhet $\pm 5\%$. I de fall då ett flöde inte kunde detekteras efter utförd injektering ansattes flödet till 0,083 l/min, vilket är den övre gränsen för icke detekterbart flöde för den flödesmätare som användes. Motsvarande transmissivitet vid aktuellt tryck indikeras av svart symbol. Kompletterande mätningar med lägre mätgräns för att påvisa ytterligare tätning var planerade men kunde inte utföras inom projektet.

I intervallen kring 20–30 m djup utfördes ett injekteringsförsök i vardera borrhål, se Figur 10. Uppmätt transmissivitet innan injektering i sektion 22,53–25,88 m DH-BH1L är i samma storleksordning som tidigare erhållna transmissiviteter i de överlappande sektionerna 19,50–24,50 m och 24,50–29,50 m, vilket sannolikt innebär att den mest vattenförande sprickan återfinns i detta intervall. Efter cementinjektering i sektionen kunde inget flöde detekteras vid maximala tre bars tryck. Vid efterföljande mätningar i borrhål DH-BH2V kring dessa djup erhöles minst en storleksordning lägre transmissivitet än vad som tidigare uppmätts under förundersökningsfasen. Resultatet indikerar att cementinjekteringen i DH-BH1L även hade en tätande effekt i sektionerna på motsvarande djup i DH-BH2V.

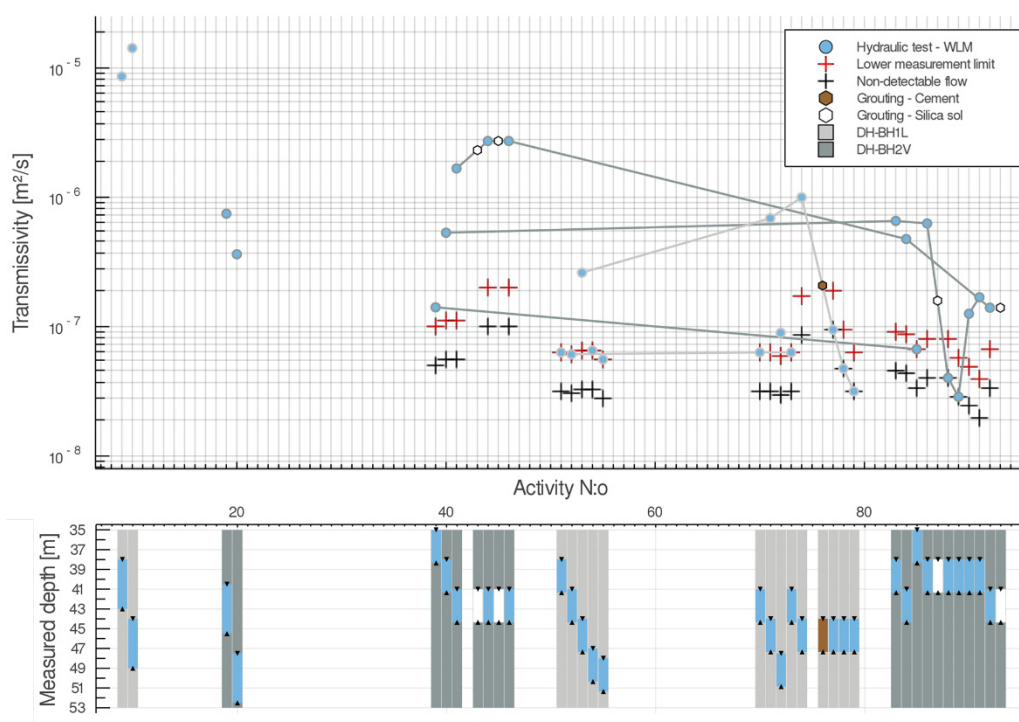
Efter injekteringen av sektion 27,00–28,56 m i DH-BH2V utfördes vattenförlustmätningar med tryck upp till 4,1 bar utan att flöde kunde detekteras. Trots det höga trycket kunde inga tecken på erosion på grund av vattenförlustmätningarna påvisas. Även i detta fall erhöles lägre transmissivitet i sektioner på motsvarande djup i DH-BH1L.



Figur 10. Resultat från vattenförlustmätningar inom intervallet 18–32 m i DH-BH1L och DH-BH2V. Inom intervallet utfördes två injekteringar i 22,53–25,88 m DH-BH1L respektive 27,00–28,56 m DH-BH2V.

Resultat från vattenförlustmätningar i intervallet 35–53 m visas i Figur 11. Två injekteringsförsök utan påvisad tätningseffekt utfördes initialt i sektion 41,00–44,35

m i DH-BH2V. Efterföljande mätningar tyder på att injekteringen dock gett en tätande effekt i DH-BH1L då uppskattade transmissiviteter är ca två storleksordningar lägre än vad som tidigare uppmäts på dessa djup. Efter injektering i sektion 44,00–47,35 m DH-BH1L samt 38–41,35 m DH-BH2V utfördes mätningar med upp till 3 bar respektive 3.5 bar utan detekterbart flöde. I det senare fallet erhöles mätbara flöden då trycket ökats till 4.1 bar, vilket tyder på att bruket slutligen har eroderats till följd av den höga tryckbelastningen.



Figur 11. Resultat från vattenförlustmätningar inom intervallet 35–53 m i DH-BH1L och DH-BH2V. Inom intervallet utfördes injekteringar i sektion 44,00–47,35 m i DH-BH1L samt i sektionerna 38,00–41,35 m och 41,00–44,35 m i DH-BH2V.

På grund av den relativt höga mätgränsen för detekterbart flöde har den tätning som i absoluta tal uppnåts i de injekterade sektionerna inte kunnat klarläggas fullt ut. I Tabell 2 redovisas högsta respektive lägsta transmissivitetsvärden som skattats utifrån tester utförda före och efter injekteringsförsöken. Notera att samtliga skattningar efter injektering svarar mot ett ansatt minsta detekterbart flöde.

Tabell 2. Högsta och lägsta transmissivitetsvärden skattade utifrån vattenförlustmätningar utförda före och efter injekteringsförsöken.

Borrhål ID	Sektion (m)	Bruk	Max. T före inj. (m²/s)	Min. T efter inj. (m²/s)	Minskning (%)
DH-BH1L	22,53–25,88 m	Cement	2,01E-6	3,16E-8	98,4 %
DH-BH2V	27,00–28,56 m	Silica sol	3,24E-7	2,04E-8	93,7 %
DH-BH1L	44,00–47,35 m	Cement	1,00E-6	3,16E-8	96,8 %
DH-BH2V	38,00–41,35 m	Silica sol	6,57E-7	2,87E-8	95,6 %

6 Diskussion och slutsats

Det genomförda projektet utfördes i syfte att undersöka möjligheten till att tillämpa injektering som en tätande åtgärd för att reducera eller förhindra utläckage av vatten i öppna, tryckbärande borrhål. Projektet är ämnat som ett första steg i utvecklingen av en koaxial borrhålsvärmväxlare avsedd för högtemperaturlagring i hårt berg.

Inom projektet har en designmetodik och procedur utvecklats för genomförande av injektering samt efterföljande hydrauliska mätningar i avskärmade borrhålssektioner. Målet var att erhålla en tätad borrhålssektion som kan öppnas och trycksättas kort efter injektering utan risk för negativ påverkan på tätningen. Fältförsök utfördes för att testa metodiken under praktiska förhållanden.

Sammantaget visar resultaten att tätning av sprickor med både cement och silica sol samt efterföljande hydrauliskt test kort efter injektering har kunnat utföras enligt det förfarande som utvecklats inom ramen för projektet. Att beakta risken för erosion av bruket i design och utförande av injekteringen är av stor vikt för att uppnå erforderlig och beständig täthet och möjliggöra en effektiv och snabb injekteringsprocess, i synnerhet vid storskalig produktion.

Potentialen i att tillämpa injektering som en aktiv metod för att producera borrhålsvärmväxlare avsedda för högtemperaturlager är avhängig på de generella täthetskrav som föreligger för att tillgodose erforderlig hydraulisk och termisk prestanda i systemet. Frågan kring vilken täthetsgrad som fordras givet specifika förutsättningar har inte omfattats av detta projekt och bör utredas i framtiden. Det konstaterades dock att förutsättningar finns för att uppnå mycket låg genomsläpplighet genom fintätning med icke cementbaserade injekteringsmedel så som silica sol. I framtida utredningar bör även andra tänkbara mekanismer som kan påverka injekteringsmaterialets verkan och bergmassans genomsläpplighet vid storskalig och långvarig drift beaktas, till exempel till följd av termoinducerade rörelser och kemiska processer.

Typiskt utgörs spricksystemet av en hög andel sprickor med liten sprickvidd och låg transmissivitet medan ett fåtal större sprickor står för merparten av den totala transmissiviteten i spricknätverket. Detta noterades bland annat vid de cementinjekteringar som utfördes i DH-BH1L. Om erforderlig täthet kan erhållas genom att tätningen fokuseras till större sprickor kan omfattningen av insatserna således begränsas väsentligt i många fall. För att ytterligare reducera behovet av tätning kan en tänkbar lösning vara att förse borrhålet med infodring i de ytnära delarna och tillämpa injekteringsåtgärder på större djup, eftersom bergets vattenförande förmåga inte sällan avtar med djupet. Sådana tendenser observerades även på undersökningsplatsen under projektet.

Generellt krävs en mycket god förståelse av grundvattenförhållanden och bergmassans spricksystem för att bedömning av genomförbarhet samt för att uppnå ett fullgott utfall av tätningsinsatserna och säkerställa att en välfungerande fullskalig lösning kan implementeras. Trots omfattande förundersökningsarbeten råder det alltid osäkerheter kring omfattningen av de insatser som kan komma att

behövas, vilket bidrar till svårigheter vid uppskattningar av tidsåtgång och kostnad för produktionen. För storskalig produktion krävs en systematisk strategi för injektering och kontroll. En potentiell lösning vore att utföra hydrauliska tester och injektering successivt i samband med borrning.

TRYCKBÄRANDE BORRHÅL FÖR HÖGTEMPERATURLAGER

Att kunna lagra höggradig värme mellan olika säsonger är något som flera energibolag strävar efter. Det är framför allt de företag som sommartid har en outnyttjad värmeresurs och som under vintern kan ersätta en dyrare produktion med lagrad värme.

Borrhålslager är en bra lösning, men det finns ett stort behov av utveckling. Det gäller bland annat att få fram kostnadseffektiva kollektorlösningar som är anpassade för höga temperaturer. Det här är en sammanfattning av ett projekt som har undersökt öppna, tryckbärande borrhål med en koaxial kollektorkonfiguration anpassad till temperaturer upp till hundra grader Celcius. Borrhålets täthet har undersökts särskilt, både genom aktiva tätningsprocesser och genom att studera täthet beroende på borrhålsmetod.

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