



RIDÅINJEKTERING

FILE HAJDAR OCH VÄSTRA BROTTET



2023-11-10



RIDÅINJEKTERING

FILE HAJDAR OCH VÄSTRA BROTTET

Uppdragsnamn	1650142 SE-Slite Fältundersökningar
Uppdragsnummer	10330449
Författare	Åsa Fransson
Datum	2023-11-10
Ändringsdatum	
Granskad av	Anna Vickman
Godkänd av	Jakob Eng

KUND

Heidelberg Materials Cement Sverige AB

KONSULT

WSP

Box 13033
402 51 Göteborg
Besök: Fabrikstorget 1
Tel: +46 10-722 50 00
WSP Sverige AB
Org nr: 556057-4880
wsp.com

KONTAKTPERSONER

INNEHÅLL

1	Bakgrund och syfte	4
2	Underlag	4
3	Geologiska och hydrogeologiska förhållanden	4
4	Genomförande ridåinjektering	8
4.1	Hydrauliska tester	9
4.1.1	Spinner-flödesloggning	9
4.1.2	Vattenförlustmätning (VFM)	9
4.2	Injektering	11
5	Resultat och diskussion	12
5.1	Spinner-flödesloggning	12
5.2	Vattenförlustmätning (VFM)	14
5.3	Injekteringsresultat baserat på hydrauliska tester – hydraulisk effekt	17
6	Sammanfattning och Slutsatser	19
7	Referenser	20

1 BAKGRUND OCH SYFTE

Heidelberg Materials Cement Sverige AB (tidigare Cementsa och hädanefter benämnt Heidelberg Materials) har sedan 1915 bedrivit kalkstenstakt på fastigheten Othem Österby 1:229 i Slite, Gotland.

Heidelberg Materials har inom ramen för sitt befintliga täkttillstånd ålagts att ridåinjektera delar av den västra väggen i Västra brottet i syfte att begränsa inflödet av sötvatten till tåkten. Den ridåinjekterade sträckan uppgår efter avslutat arbete till ungefär 1 340 m.

Arbetet vid Västra brottet var uppdelat i två delar: 1) ett försök längs en sträcka på 50 m, som avsåg klargöra hur väl tekniken med borring, vattenförlustmätningar och injektering fungerar på plats, och 2) utförande av ridåinjektering längs västra kanten som uppgick till 1340 m.

Heidelberg Materials har även låtit testa ridåinjektering i File hajdar-tåkten, längs med två sträckor à 50 m som även dessa avsåg klargöra hur väl tekniken med borring, vattenförlustmätningar och injektering fungerar på plats. Arbetet har utförts på samma sätt som för den korta 50 m sträckan vid Västra brottet.

Ridåinjektering innebär att man tätar sprickor i berget genom att via en rad med borrhål injektera ett tätande medel. Tätningsmedlet har i detta fall utgjorts av cement. Arbetet har utförts genom borring, vattenförlustmätning och injektering. När det fungerar väl blir effekten att genomsläppligheten och vattenflödet tvärs ridån minskar.

2 UNDERLAG

Denna rapport utgår huvudsakligen från följande underlag:

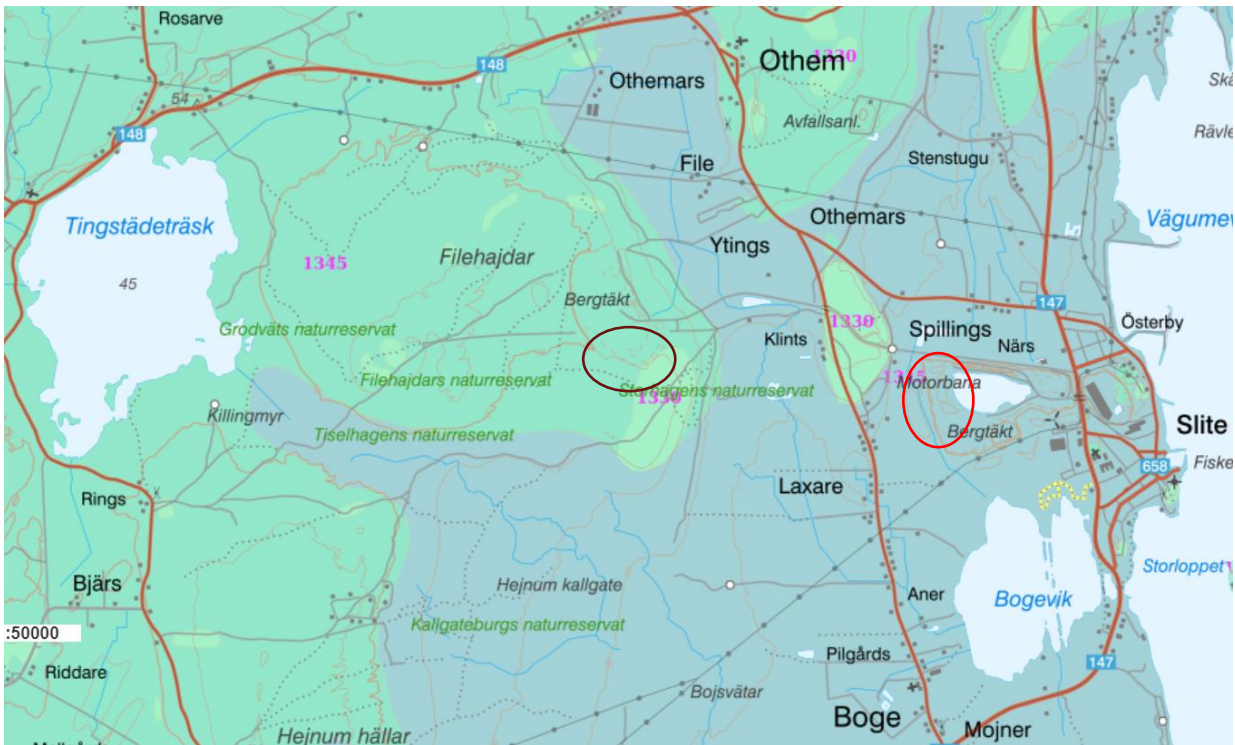
- Berggrundskarta, jordartskarta, SGU (2023).
- SkyTEM, Dahlqvist, P., Triumf, C-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., & Schonning, K. (2017)
- Data från utförande av ridåinjektering (spinner-flödesloggning, borrprotokoll, vattenförlustmätningar, injektering – bruksåtgång).

3 GEOLOGISKA OCH HYDROGEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN

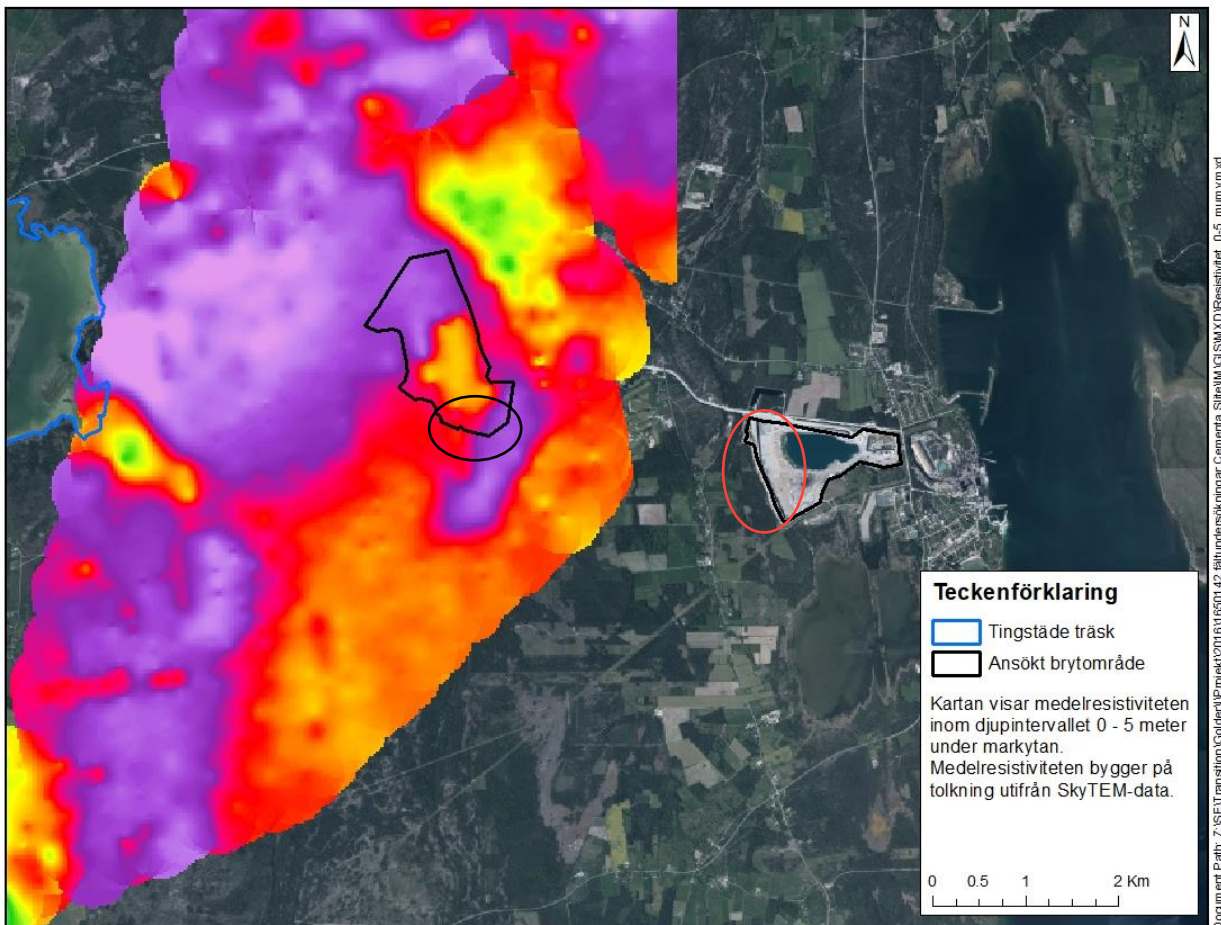
Berggrunden vid File hajdar-tåkten och Västra brottet domineras av sedimentära bergarter, se Figur 1. De huvudsakliga bergarterna är mörkgrå kalkarenit (grå), kalkarenit (grön) samt revartad kalksten (ljusgrön), se Figur 1. Områden där ridåinjektering har utförts indikeras med cirklar i Figur 1 och Figur 2. Område 1 och Område 2 ligger vid File hajdar-tåkten och markeras med den vänstra cirkeln. Området för ridåinjekteringen vid Västra brottet markeras av den högra cirkeln. Jordartskartan (Figur 3) visar huvudsakligen torv (brun), lera-silt (ljusgul), postglacial sand och svallsediment-grus (orange), isälvsediment (grön), moränlera eller lerig morän (ljuslila), lerig morän (ljusblå) samt sedimentärt berg i dagen (blå).

Mer detaljerade kartor för Västra brottet och File hajdar-tåkten presenteras i Figur 4 och Figur 5. Område 1 vid File hajdar-tåkten återfinns till höger på kartan i Figur 5 och Område 2 till vänster.

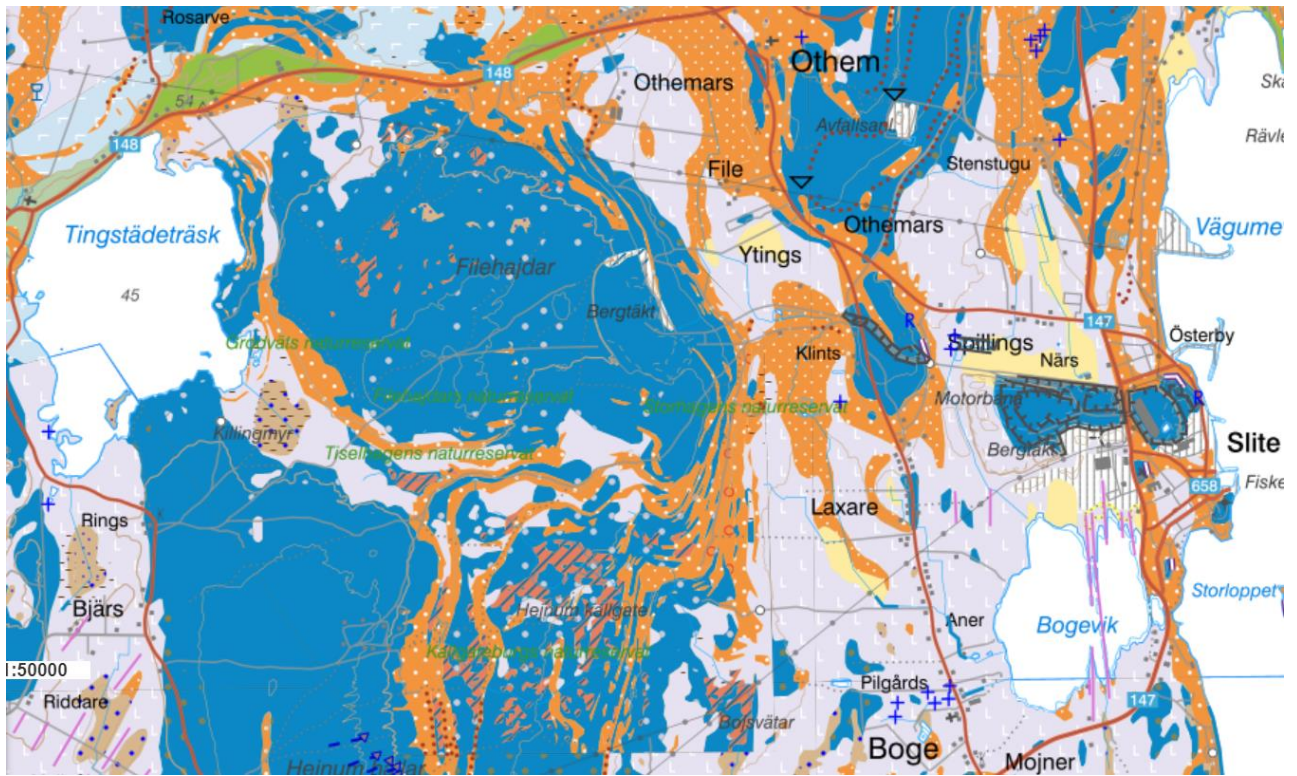
De huvudsakligt vattenförande strukturerna förväntades vara riktningberoende, dvs horisontella, och konnekterade (stora).



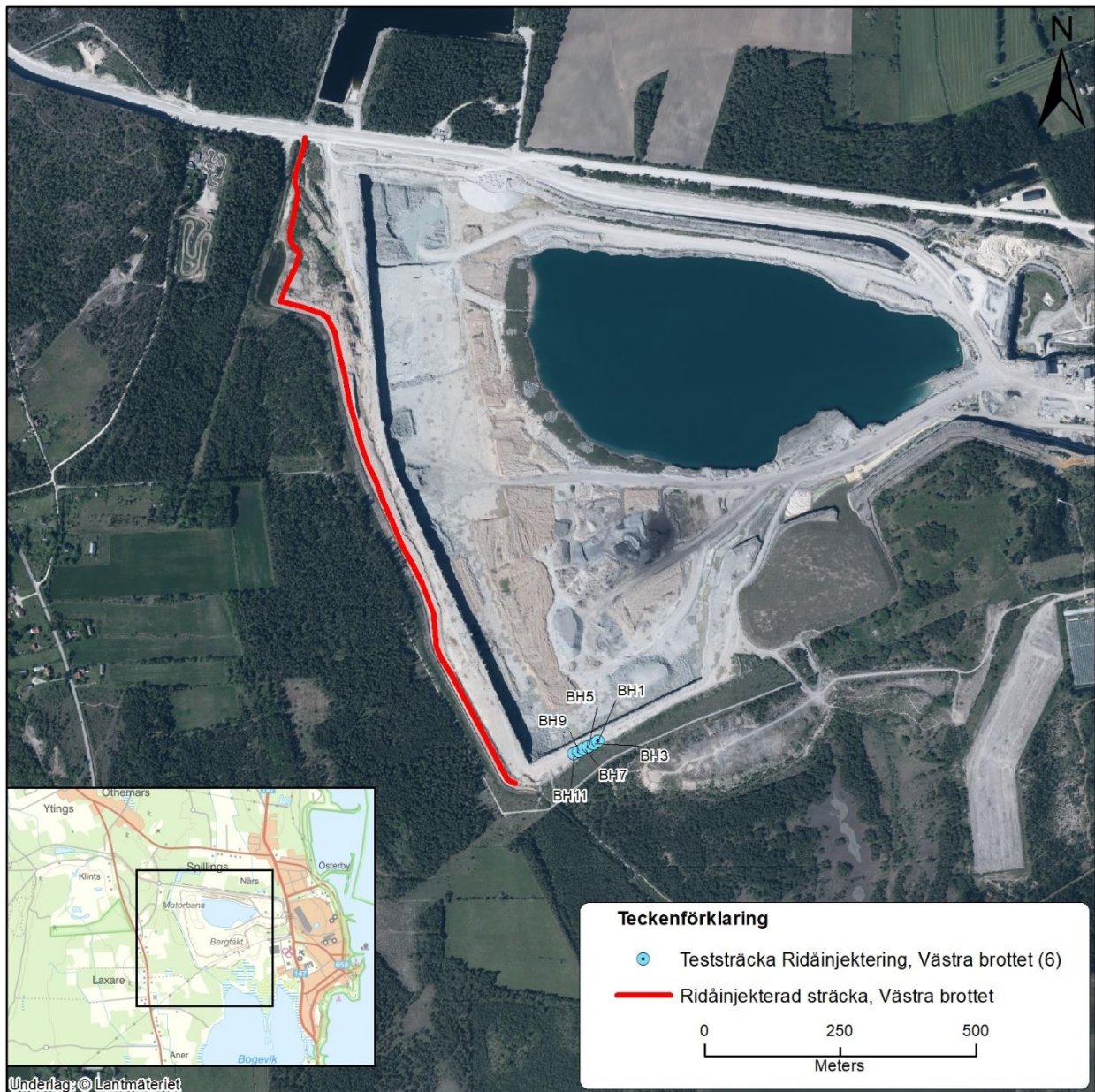
Figur 1. Vid området för File hajdar-täkten och Västra brottet visar berggrundskartan: mörkgrå, kalkarenit (grön) samt revartad kalksten (ljusgrön). Den vänstra cirkeln visar området för ridåinjektering vid File hajdar-täkten och den högra cirkeln visar området för ridåinjekteringen vid Västra brottet.



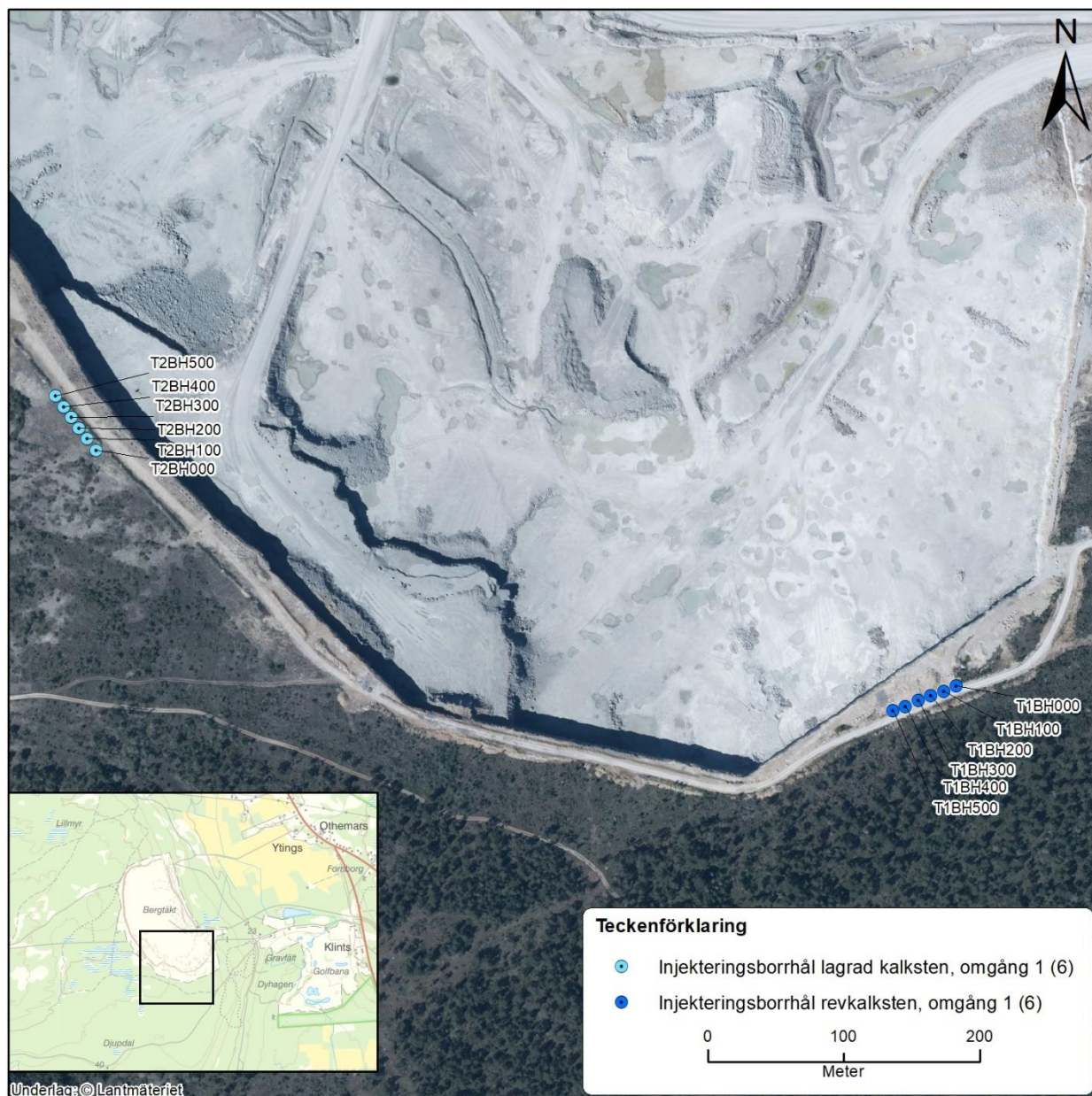
Figur 2. Vid området för File hajdar-täkten tolkade bergarter från SkyTEM-data där det lila tolkas som revartad kalksten (stromatoporoidkalksten) och det röda som lagrad kalksten (kalkarenit). Den vänstra cirkeln visar området för ridåinjektering vid File hajdar-täkten och den högra cirkeln visar området för ridåinjekteringen vid Västra brottet.



Figur 3. Vid området för File hajdar-täkten och Västra brottet visar jordartskartan (höger) huvudsakligen torv (brun), lera-silt (ljusgul), postglacial sand och svallsediment-grus (orange), isälvsediment (grön), moränlera eller lerig morän (ljuslila), lerig morän (ljusblå) samt sedimentärt berg i dagen (blå). (SGU, 2023).



Figur 4. Ridåinjektering vid Västra brottet, med injekteringsförsök i söder och ridåinjektering längs västra kanten.



Figur 5. Ridåinjektering vid File hajdar-täkten. Till höger Område 1, Omgång 1 (6 borrhål i revkalksten och i underkant revkalksten). Till vänster Område 2, Omgång 1 (6 borrhål i lagrad kalksten). Borrhålen visas med grön färg i Figur 6 (inbördes hålavstånd 10 m).

4 GENOMFÖRANDE RIDÅINJEKTERING

Data för hydrogeologisk beskrivning, injekteringsutformning och uppföljning, togs fram genom spinner-flödesloggning, vattenförlustmätning (VFM) och mätning av bruksåtgång för File hajdar-täkten. För Västra brottet användes vattenförlustmätning och mätning av bruksåtgång för beskrivning, utformning och uppföljning. Samtliga injekteringsborrhål vid Västra brottet och File hajdar-täkten var vertikala med fokus på de huvudsakligt vattenförande strukturerna som förväntades vara horisontella.

Injekteringen för västra kanten vid Västra brottet (1340 m) och injekteringen vid File hajdar-täkten har utförts enligt samma princip, denna beskrivs nedan.

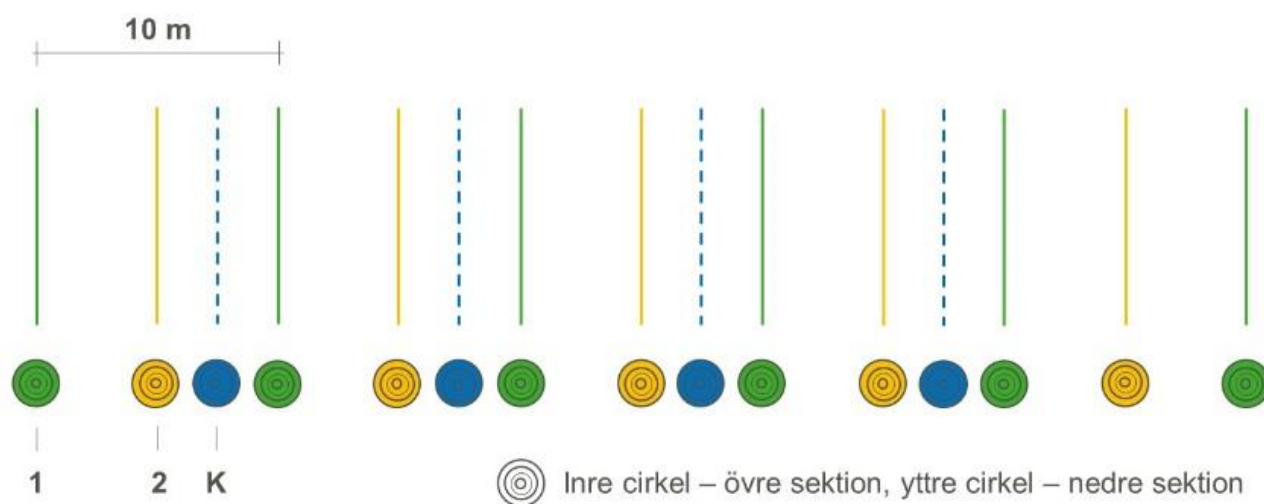
Ridåinjekteringen utfördes i två omgångar, Omgång 1 och Omgång 2. Omgång 1 inleddes det med borring av sex borrhål, se gröna cirklar i Figur 6. Denna första omgång hade ett inbördes hålavstånd av 10 m och för File hajdar-täkten följdes borringen av spinner-flödesloggning. Vattenförlustmätning och injektering utfördes

både vid Västra brottet och vid File hajdar-täkten. Detta gjordes med enkelmanschett för olika nivåer. Baserat på resultat för de olika nivåerna skattades sedan värden för enskilda sektioner.

För de 15 borrhålen i Figur 6 visas ett antal cirklar inom varje cirkel. Den yttre cirkeln avser representera nedre sektion och den inre cirkel avser representera övre sektion, övriga sektioner representeras med mellanliggande cirklar. Detta används för att visualisera var de mest genomsläppliga sektionerna återfinns, se exempel i Figur 10 där den mest genomsläppliga strukturen återfinns för tredje cirkeln från mitten för respektive borrhål, i detta fall inom ett djupintervall på 43–52 m.

Nästa steg var borrning av fem mellanliggande borrhål, Omgång 2, vilket representeras av gula cirklar i Figur 6. Detta resulterade i ett inbördes hålavstånd på 5 m, och vattenförlustmätning och injektering utfördes. Avslutningsvis borrades fyra kontrollhål, vilka representeras av blå cirklar, se Figur 6. Detta följdes av vattenförlustmätning och injektering alternativt enbart hålfyllnad. Några borrhål lämnades oinjekterade för att möjliggöra framtida uppföljning.

Arbets sättet med mellanliggande borrhål beskrivs ofta med termen "split-spacing", som kan översättas med "delat avstånd". Detta möjliggör såväl kontroll av resultat som kompletterande injektering.



Figur 6. Principiell geometri injekteringsförsök. Omgång 1 (grön, 1), Omgång 2 (gul, 2) och borrhål för kontroll (blå, K). Inre cirkel – övre sektion, yttre cirkel – nedre sektion.

4.1 HYDRAULISKA TESTER

Spinner-flödesloggning utfördes som tidigare beskrivits för att identifiera djup för de huvudsakligt vattenförande strukturerna som underlag för beslut om manchettplacering. Detta gjordes för Område 1 och Område 2 vid File hajdar-täkten.

Vattenförlustmätning genomfördes för att fånga den rumsliga fördelningen av hydrauliska egenskaper, beskrivet med specifik kapacitet, Q/dh , eller transmissivitet, T [m^2/s], alternativt hydraulisk konduktivitet, K eller $Q/dh/L$ [m/s]. Vattenförlustmätning utfördes även för att bedöma om de vattenförande strukturerna i bergmassan hade potential att vara injekterbara med valt injekteringsmaterial vilket kunde följas upp genom att se så att vattenförlust och bruksåtgång följdes åt.

4.1.1 Spinner-flödesloggning

Spinner-flödesloggning utfördes efter de 6 första borrhålen för omgång 1 hade borrats i både Område 1 och Område 2 vid File hajdar-täkten. Resultat och anpassad manchettplacering redovisas i Figur 8 och Figur 9.

4.1.2 Vattenförlustmätning (VFM)

Inför vattenförlustmätning gjordes en inledande nedmätning för att identifiera grundvattennivåns läge, h_w , se illustration i Figur 7 och tredje kolumnen i Tabell 1. Denna nedmätning relaterade till överkant foderrör som

generellt återfanns någon decimeter över markytan. Nedmätningen är att betrakta som ungefärlig då återhämtning efter borrning kan ta olika lång tid beroende på den lokala genomsläpligheten.

Framtagna sektioner, baserade på placering för nederkant enkelmanschett, redovisas principiellt för de tre testområdena i Figur 10, Figur 11 och Figur 12. Placering för nederkant manschett, liksom nedmätningen, utgår från foderrörets överkant.

Vattenförlustmätning utfördes genom att mäta den utpumpade volymen vatten under två minuter vid ett tryck vid markytan på ungefär 3 bar. Mätningen utfördes från manschett till botten av borrhålet. Ökningen i tryck, dh , vilken behövdes för att skatta specifik kapacitet, Q/dh , togs fram på två sätt, dels genom att addera uppmätt tryck vid markytan, h_p , till nedmätning till grundvattennivån, h_w , se Figur 7, dels baserat på tryck registrerat med diver under manschett, h_{diver} , samt avstånd från diver till grundvattenytan. Tryck från diver har följts upp för vissa, men inte samtliga, tester.

Flödet, Q , skattades genom att dividera utpumpad volym med tid. Maxflödet vid 3,5 bar bedömdes för mätutrustningen vara mellan 400–570 liter/min. Intervallet bedömdes vara en konsekvens av hur slangen var lindad, högre upp i borrhålet var mer slang upplindad vilket reducerade kapaciteten.

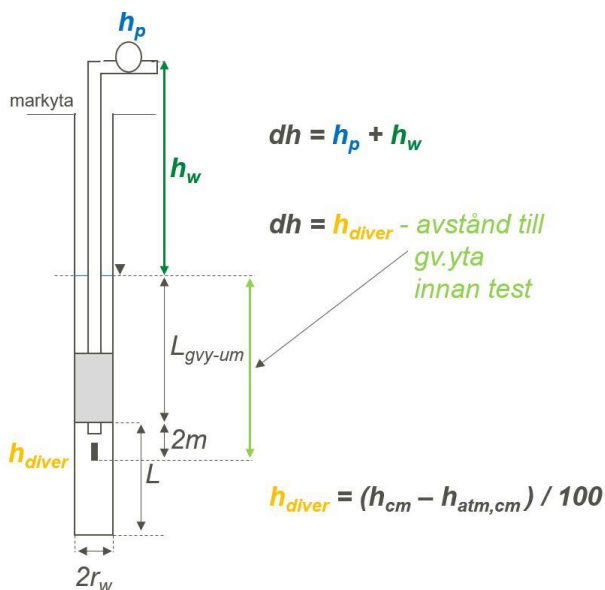
Flödet, Q_{VFM} , i Tabell 1 visar flöde i liter/min. Flödet relaterar till testlängd från manschett till botten av borrhålen. På första raden för respektive borrhål återfinns värden för den nedersta delen av borrhålen, B eller nivå 0. För borrhålsnamn som slutar med 3 undersöks hela borrhålet (från manschettens underkant).

Flöde för specifika sektioner för borrhålen, Q_{VFMS} , Tabell 2, skattades genom att för varje vattenförlustmätning dra ifrån flödet för underliggande nivå. Manschettplacering för motsvarande mätningar användes för att ta fram specifika sektioners längd, L_s . Lägre flöden för tester med manschettplacering på ytliga nivåer kan förklaras med utrustningens reducerade kapacitet.

Baserat på ovan data skattades specifik kapacitet, Q/dh , och hydraulisk vidd, b_{hyd} . Specifik kapacitet antogs vara ungefär lika med transmissiviteten, T :

$$\frac{Q}{dh} \approx T = \frac{\rho_v g b_{hyd}^3}{12\mu_v}$$

Den högra delen av ekvationen kallas för kubiska lagen (Witherspoon et al. 1980) och antar en enskild, plan-parallell spricka. Förutom hydraulisk vidd, b_{hyd} , innehåller ekvationen vätskans densitet, ρ_v , för beräkningarna antagen till 1000 kg/m³, gravitationen, g , samt viskositeten för vätskan, μ_v , här antagen till 1,3E-3 Pas.



Figur 7. Skattning av dh baserat på 1) uppmätt tryck på markytan, h_p , samt avstånd från mät punkt till grundvattenytan, h_w , alternativt 2) tryck registrerat med diver, h_{diver} , samt avstånd från diver till grundvattenyta innan test. Diveren var för testerna placerad 2 m under underkant manschett.

4.2 INJEKTERING

Injektering utfördes med ett cementbaserat injekteringsmaterial, Injektering 30, och ett injekteringstryck som generellt var mellan 5–10 bar, det lägre trycket för ytlig sektion. Kriterier för att avbryta injekteringen var en injekteringstid på mellan 20–40 minuter, beroende av djup för manschettplacering och vattencementtal för injekteringsmaterialet. Vidare var den maximalt tillåtna volymen (injekteringsmaterial) generellt satt till 200 liter per sektion (exklusive borrhålsvolym), sektionerna var 8–30 m långa. Som flödeskriterie för att avbryta injekteringen användes att flödet under pågående injektering, under 5 min, skulle vara lägre än 2 l/min.

Skattningen nedan visar inträngningslängd för ett injekteringsöverttryck, Δp , på 5 bar (0,5 MPa eller $5 \cdot 10^5$ Pa), en flytgräns på 3 Pa och en viskositet på 22,5 mPas där den maximala inträngningslängden, I_{max} , och den karakteristiska tiden, t_0 , blir:

$$I_{max} = \frac{\Delta p \cdot b}{2 \cdot \tau_0} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 430 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3} = 35,8 \text{ m}$$
$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 22,5 \cdot 10^{-3}}{3^2} = 7500 \text{ s} = 125 \text{ min}$$

Värden för flytgräns och viskositet är rimliga för valt injekteringsmaterial. För en injekteringstid, t , på 20 min fås vidare den dimensionslösa injekteringstiden:

$$t_D = \frac{t}{t_0} = \frac{20}{125} = 0,16$$

vilket motsvarar en dimensionslös inträngningslängd, I_D , på ungefär 0,29 (dvs 29% av I_{max}) vilket ger inträngningslängden:

$$I = I_D \cdot I_{max} = 0,29 \cdot 35,8 = 10,5 \text{ m}$$

Ekvationerna ovan återfinns exempelvis i Fransson et al. (2016). Inträngningslängden 10,5 m för vidden 430 μm finns representerad överst bland de grå linjerna i Figur 7. Övriga linjer visar inträngning för vidderna 380, 250 respektive 90 μm . Skattad inträngningslängd är i samma storleksordning som hålavståndet. Som önskat i designen, indikerar skattad inträngningslängd att man för större sprickor når åtminstone halva vägen till närliggande hål vid hålavståndet 10 m. Vill man öka möjligheten att täta också mindre vidder eller mer heterogena delar av en struktur kan en mellanliggande omgång göra ytterligare nytta. Hålavståndet blir i sådana fall 5 m. Den största reduktionen kan dock förväntas för den första omgången. Räknar man enbart på maximal volym, 200 liter, skulle vidden 430 μm ge en cirkel med radien (inträngningen) 12 m, $V=b\pi (R^2 - r^2)$, där diametern är 115 mm.

Det valda injekteringsmaterialet, Injektering 30, har en kornstorleksfördelning med en d_{95} på 30 μm . Som en principiell, förenklad riktlinje, bör sprickvidden vara större än tre gånger materialets d_{95} , dvs $3 \cdot 30 = 90 \mu\text{m}$ (t.ex. Martinet 1998).

Baserat på kubiska lagen, avsnitt 4.1.2, skulle den specifika kapaciteten, Q/dh , vara $4,6\text{E}-7$ m^2/s om man utgår ifrån en hydraulisk vidd på 90 μm . Detta skulle motsvara en vattenförlust på cirka 2 liter eller ett flöde på ungefär 1 liter/min (för 2 minuter och vid 3 bar, $2 \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 30 \cdot 4,6\text{E}-7$). Motsvarande värde för både tryck och nedmätning, dvs runt 5 bar, ger värden i samma storlek. Borrhål med vattenförluster som överstiger 1 liter/min hade potential att vara injekterbara med det valda injekteringsmaterialet.

5 RESULTAT OCH DISKUSSION

5.1 SPINNER-FLÖDESLOGGNING

Den inledande spinner-flödesloggningen identifierade genomsläppliga strukturer vid 40–41 m, 50–51 m samt 54,5–55,5 m (från överkant foderrör, som återfanns nära markytan), se illustration i Figur 8. Vid sidan av lägen för dessa strukturer visar illustrationen även att strukturen mellan 50–51 m kunde identifieras i samtliga sex borrhål. Något som inte är lika tydligt för de vattenförande strukturerna ovanför och under.

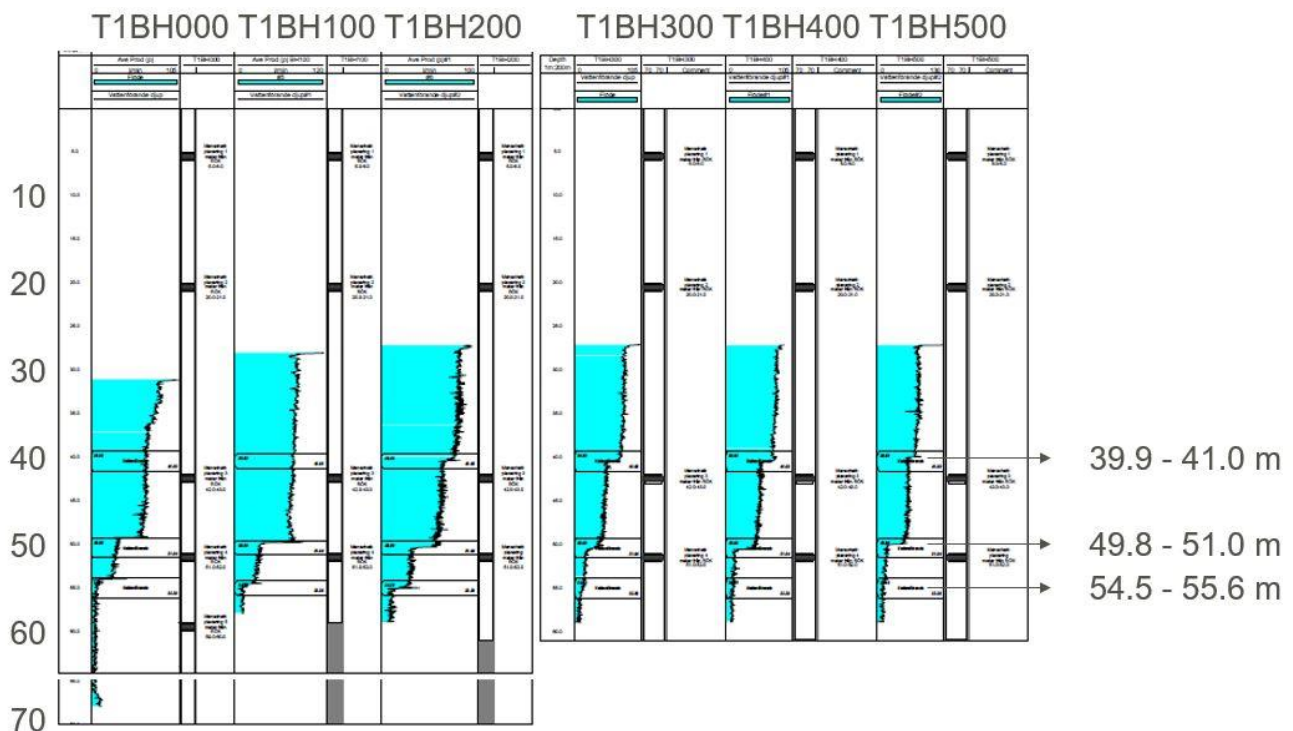
Att denna struktur kan ha särskild betydelse bekräftas också med resultat från vattenförlustmätningar. De generellt mest vattenförande strukturerna återfanns inom djupintervallet (sektionen) 43–52 m, se tredje cirkeln från mitten för respektive cirkel i Figur 10, där röd färg indikerar högst genomsläpplighet. Denna högre genomsläpplighet kan identifieras i samma intervall för samtliga borrhål i Omgång 1 (gröna linjer).

Även i protokoll från vattenförlustmätning finns noterat att "T1BH000-T1BH500 har samband från nivå 1", där nivå 1 motsvarar manschettläget 43 m. Vad avser anisotropi så förväntades de huvudsakligt vattenförande strukturerna vara riktningsberoende, horisontella och konnekterade (stora), vilket resultaten, särskilt intervall 43–52 m och strukturen vid 50–51 m, också pekar på.

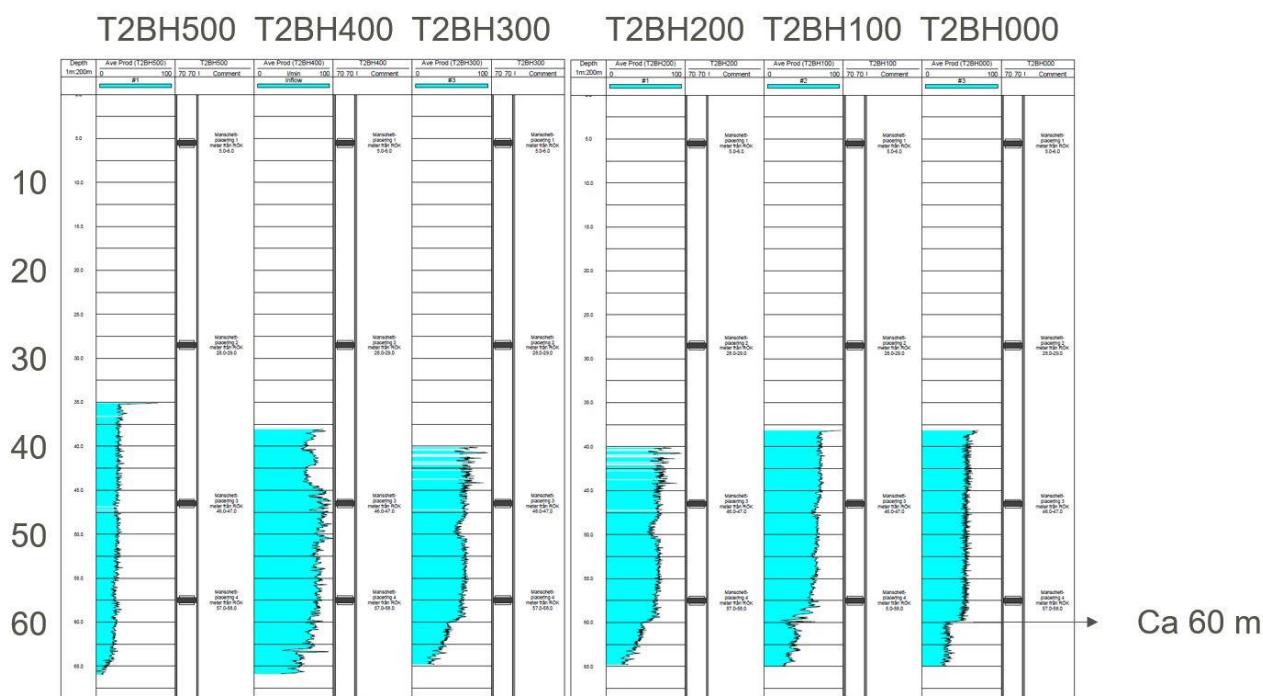
Figur 9 visar spinner-flödesloggning för Område 2 i File hajdar-täkten. Den tydligaste strukturen återfanns vid djupet 60 m men den är inte lika tydlig som strukturen vid djupet 50–51 m i Område 1 i File hajdar-täkten.

Illustrationerna i Figur 10, Figur 11 och Figur 12 utgår samtliga från samma intervall där röd indikerar de mest genomsläppliga sektionerna. För de röda sektionerna var skattad hydraulisk vidd, b_{hyd} , större än 430 μm , antaget en enskilda spricka, $Q/dh > 5E-5 \text{ m}^2/\text{s}$. Orange motsvarar intervallet 430–251 μm $5E-5 > Q/dh > 1E-5 \text{ m}^2/\text{s}$, gul motsvarar intervallet 251–93 μm ($1E-5 > Q/dh > 5E-7$), grön motsvarar $<93 \mu\text{m}$ ($Q/dh < 5E-7 \text{ m}^2/\text{s}$) och vit motsvarar ett negativt värde, vilket kan bero på kapaciteten för utrustningen till vattenförlustmätningarna. En generell jämförelse av de tre testområdena visar att Område 1 har de högsta värdena, Område 2 har de näst högsta värdena och Västra brottet har de lägsta värdena.

För Område 1 är det särskilt tydligt att värdena går från högre (röda) till lägre (orange, gul och grön) om man jämför omgång 1 (gröna linjer) och omgång 2 (orangea linjer).



Figur 8. Område 1: Spinner-flödesloggning för borrhål T1BH000, T1BH100, T1BH200, T1BH300, T1BH400 samt T1BH500. Anpassad manschettplacering (underkant manschett): 6 m, 21 m, 43 m, 52 m, 60 m. Genomsläppliga strukturer vid ca 40–41 m, 50–51 m samt 54,5–55,5 m.



Figur 9. Område 2: Spinner-flödesloggning för borrhål T2BH500, T2BH400, T2BH300, T2BH200, T2BH100 samt T2BH000 (omvänd ordning jämfört med Omgång 1). Anpassad manschettplacering (underkant manschett): 6 m, 29 m, 47 m, 58 m. Genomsläpplig struktur vid ca 60 m.

Tabell 1. Exempel på data, Område 1, Omgång 1. Vattenförlustmätning, VFM, utfördes med enkelmanschett, tryck ca 3 bar (30 m) under 2 minuter. Q_{VFM} (sektion) skattas genom att dra ifrån värde för underliggande sektion. Bruksåtgång är exklusive borrhålsfyllnad. Nedmätning grundvatten-nivå från röröverkant. Lägre packer, nederkant från röröverkant.

Borrhål	Längd [m]	h_w [m]	Packer-läge [m]	Test-längd [m]	h_p [m]	dh_{wp} (dh_d) [m]	Q_{VFM} [liter/min]	Q/dh_{wp} (d) [m^2/s]
T1BH000_B	70	21,76	60	10	26	48	261	9,1E-05
T1BH000_0		21,76	52	18	18	40	431	1,8E-04
T1BH000_1		21,76	43	27	15	37	509	2,3E-04
T1BH000_2		21,76	21	49	18	40	445	1,9E-04
T1BH000_3		21,76	6	64	20	42 (15)	413	1,6E-04 (4,7E-4)

Tabell 2. Exempel på data, Område 1, Omgång 1. Vattenförlustmätning, VFM, utfördes med enkelmanschett vid 3 bar och under 2 minuter. Q_{VFM} (S, sektion) skattades genom att dra ifrån värde för underliggande sektion. Bruksåtgång är exklusive borrhålsfyllnad. Nederkant packer: 60 m (B), 52 m (0), 43 m (1), 21 m (2), 6 m (3).

Borrhål	Q_{VFM} [liter/min]	Q_{VFM} [liter/min]	L_s [m]	dh_{wp} [m]	Q/dh_s [m^2/s]	b_{hydS} [μm]	Bruks-åtgång [liter]
T1BH000_B	261	261	10	48	9,1E-05	525	
T1BH000_0	431	170	8	40	7,1E-05	484	12
T1BH000_1	509	78	9	37	3,5E-05	383	200
T1BH000_2	445	-64	22	40	-2,7E-05	-349	200
T1BH000_3	413	-32	15	42	-1,3E-05	-273	200

5.2 VATTENFÖRLUSTMÄTNING (VFM)

Illustrationerna i Figur 10, Figur 11 och Figur 12 visar som tidigare nämnts skattad hydraulisk vidd för de olika sektionerna. För Område 1, Figur 10, var det mest genomsläppliga intervallet i den röda sektionen. De gröna, fyllda, små, symbolerna i Figur 13 visar fördelning av skattad specifik kapacitet, Q/dh , för denna mest genomsläppliga sektion (43–52 m) och för de 6 inledande borrhålen. De större, gröna, fyllda symbolerna visar motsvarande resultat för helhål (6–60 m).

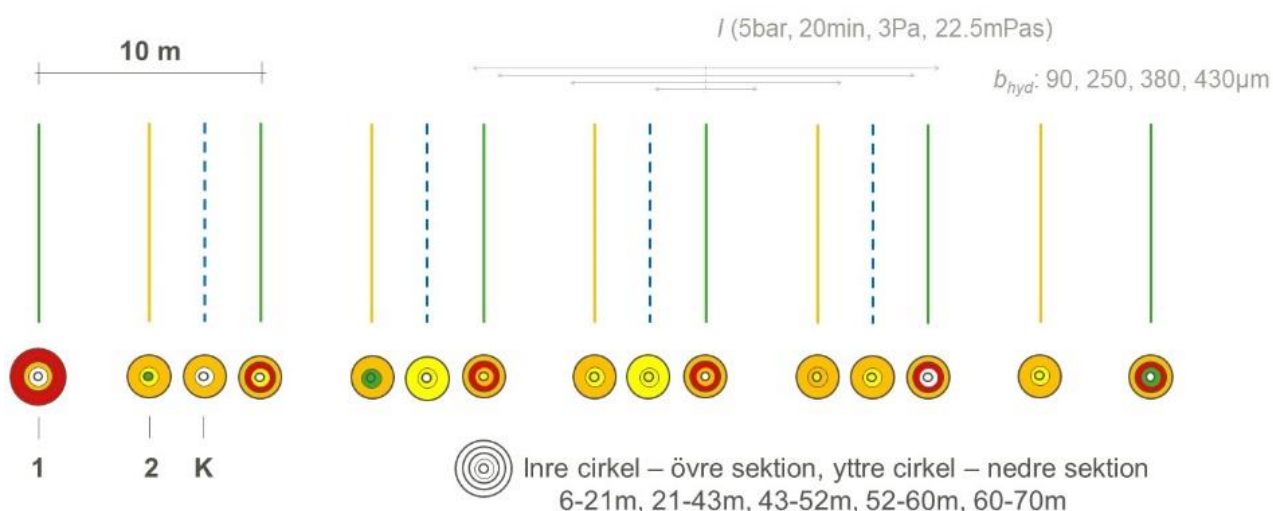
Vid en jämförelse mellan gröna, gula och blå symboler i Figur 13 kan man observera en successiv reduktion i genomsläpplighet. Gröna symboler, Omgång 1, hade ett inbördes hålavstånd av 10 m, se Figur 10. För gula symboler, Omgång 2, hade mellanliggande borrhål borrats och avslutningsvis borrades fyra borrhål för kontroll, blå symboler. För ovan nämnda borrhål skattades ändringen i tryck, dh , baserat på tryck vid markytan och nedmätning.

Förutom de fyllda symbolerna baserat på $dh = h_w + h_p$ finns även ofyllda symboler i Figur 13. För dessa har ändringen i tryck skattats baserat på tryck registrerat med diver, h_{diver} , samt avståndet från diver till grundvattenyta, $dh = h_{diver} \pm$ avstånd till grundvattenyta innan test, se Figur 7.

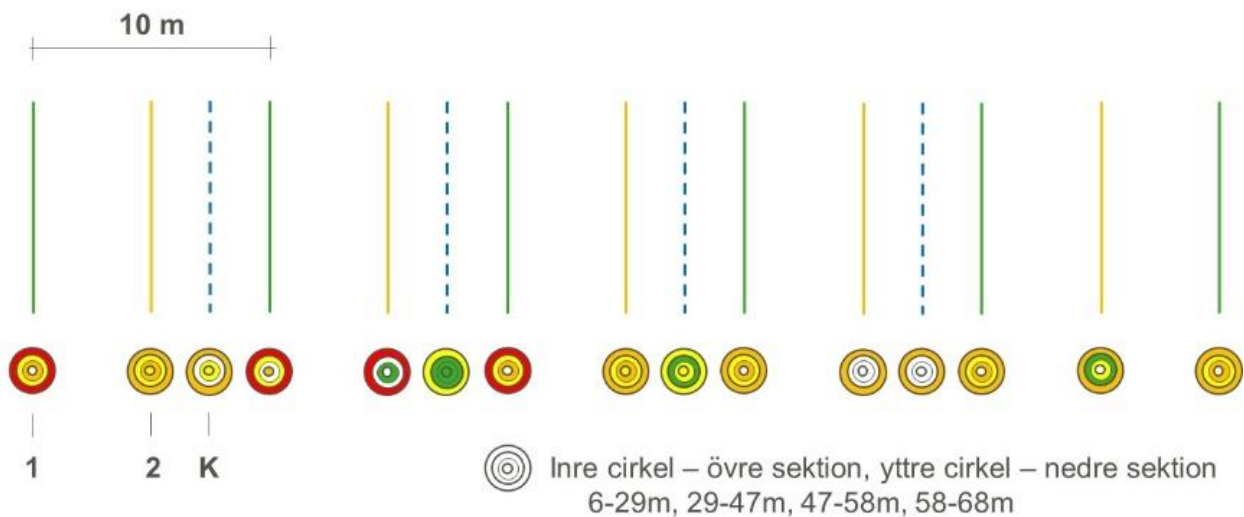
Medianen för gröna, ofyllda, symboler, med inbördes hålavstånd 10 m är då $5E-4$ m²/s. Detta är en faktor 3 till 4 gånger större än medianen baserat på tryck vid markytan och nedmätning. För gula punkter, hålavstånd 5 m, är skillnaden mellan medianerna en faktor 1,6 och för de blå kontrollpunkterna är skillnaden en faktor 1,2. Skillnaden är alltså störst för de höga värdena där skattning baserat på tryck vid markytan och nedmätning överskattar förändringen i tryck, dh , och överskattar specifik kapacitet, Q/dh . Det är också för dessa värden som kapaciteten för utrustningen påverkar mest. En gräns för flöde på 400–570 liter/min vid 3,5 bar, ger en osäkerhet för värden där $Q/dh > 1,1-1,6E-4$ m²/s med $dh: 23 + 35$ m. Oberoende av detta kan en reduktion i genomsläpplighet konstateras i varje steg.

För Område 2 saknas diverdata för att utvärdera specifik kapacitet, man kan därför inte utesluta att de högsta värdena även här är underskattade. Den mest genomsläppliga strukturen återfinns inom djupintervallet 58–68 (yttre cirkel). En sektion med ungefär samma storlek återfinns inom djupintervallet 29–47 m. Då medianen för den mest genomsläppliga sektionen utvärderats till $4,8E-5$ och för helhål till $9E-5$ m²/s skulle det kunna innebära två strukturer med ungefär samma storlek. Oberoende av detta kan en reduktion i genomsläpplighet konstateras i varje steg.

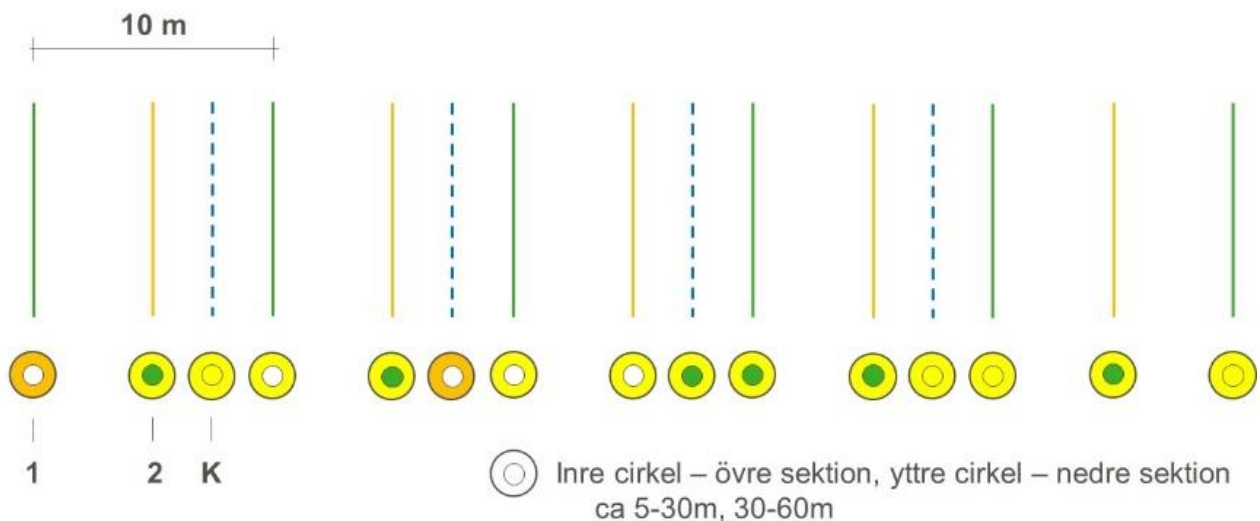
För Västra brottet var gränsen för flöde för utrustning ungefär 45 liter/min vid 3 bar. Högre värden på specifik kapacitet kan därför vara osäkra, $Q/dh > 1,3E-5$ m²/s, $dh: 25 + 30$ m. Detta kan påverka de högsta värdena men för medianen kan en reduktion observeras.



Figur 10. File hajdar-täkten, Område 1: Vattenförlustmätningar (VFM) och skattad hydraulisk vidd, b_{hyd} , baserat på $dh = h_w + h_p$. Röd: $b_{hyd} > 430$ μm ($>5E-5$ m²/s), orange: 251–430 μm ($<1E-5$ m²/s), gul: 93–251 μm, grön < 93 μm ($<5E-7$ m²/s), vit: värde kan inte skattas (men troligtvis grön). Den mest genomsläppliga strukturen återfinns inom djupintervallet 43–52 m (tredje cirkeln från mitten). Observera att det finns en genomsläpplig struktur också mellan 60–70 m för det första, djupare, borrhålet. Skattad inträngningslängd indikerar att man för större sprickor når åtminstone halva vägen till närliggande hål vid hålavståndet 10 m.



Figur 11. File hajdar-täkten, Område 2: Vattenförlustmätningar (VFM) och skattad hydraulisk vidd, b_{hyd} , baserad på $dh = h_w + h_p$. Den mest genomsläppliga strukturen återfinns inom djupintervallet 58–68 m (yttre cirkel). Sektion med ungefär samma storlek på flödesförlust återfinns inom djupintervallet 29–47 m.



Figur 12. Västra brottet, VB, 50 m: Vattenförlustmätningar (VFM) och skattad hydraulisk vidd, b_{hyd} , baserad på $dh = h_w + h_p$. Den mest genomsläppliga strukturen återfinns inom djupintervallet 30–60 m (yttre cirkel).

Område 1: Specifik kapacitet, Q/dh , djup 43-60m L: 17 m (L: 8 m, Omgång 1)



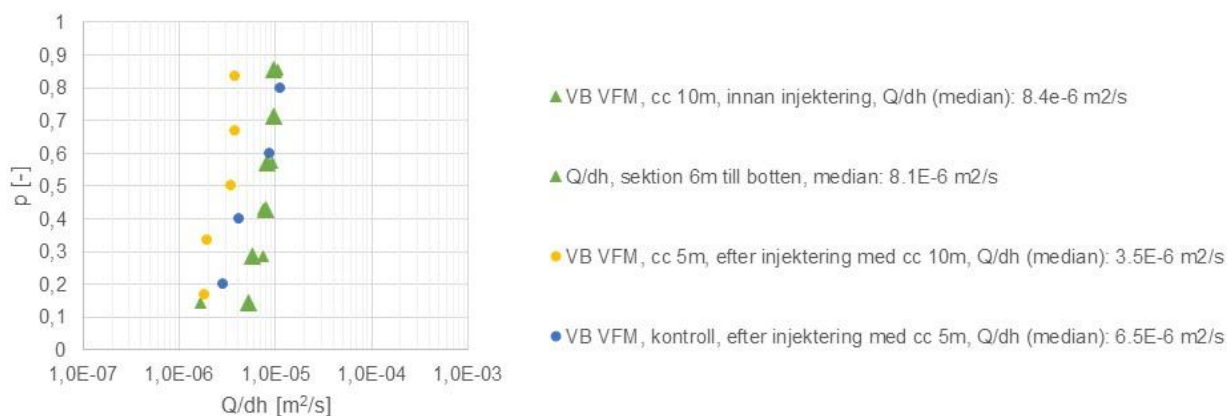
Figur 13. File hajdar-täkten, Område 1 (revkalksten, revets underkant): Q/dh för den mest genomsläppliga sektionen (43–60 m). Fyllda symboler, $dh = h_w + h_p$, ofyllda symboler, $dh = h_{diver} \pm$ avstånd till grundvattnenytta innan test (baserat på nedmätning). Reduktion i varje steg. Gräns flöde: 400–570 liter/min vid 3.5 bar.

Område 2: Specifik kapacitet, Q/dh , djup 58-68m L: 10 m



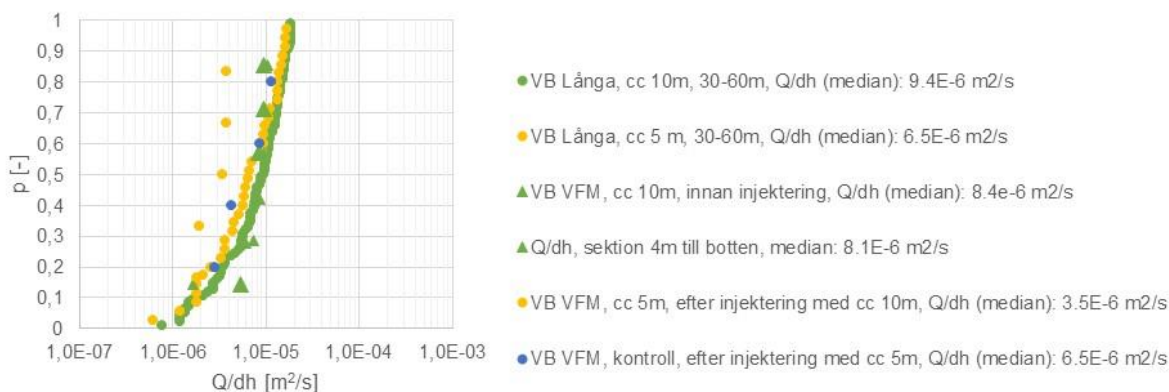
Figur 14. File hajdar-täkten, Område 2 (lagrad kalksten): Q/dh för den mest genomsläppliga sektionen (58–68 m). Sektion 29–47 m har strukturer i samma storleksordning som 58–68 m (skillnad mellan gröna kvadrater). Reduktion (median) i varje steg.

VB: Specifik kapacitet, Q/dh , djup 30-60m L: 10 m



Figur 15. Västra brottet, VB, 50 m (lång injekteringsträcka, mägerl): Q/dh för den mest genomsläppliga sektionen (30–60 m), Fyllda symboler, $dh = h_w + h_p$. Gröna, större, symboler, Q/dh för helhål (ca 5–60 m). Reduktion (median) i varje steg. Gräns flöde: 45 liter/min vid 3 bar, $Q/dh > 1,3E-5 \text{ m}^2/\text{s}$, $dh: 25 + 30 \text{ m}$.

VB Korta och Långa sträckan: Specifik kapacitet, Q/dh , djup 30-60m L: 10 m



Figur 16. Västra brottet, VB, Korta teststräckan (50 m) och Långa sträckan (mägerl): Q/dh för den mest genomsläppliga sektionen (30–60 m), Fyllda symboler, $dh = h_w + h_p$. Gröna, större, symboler, Q/dh för helhål (ca 4–60 m). Reduktion (för median) med ca 30 % (6,5E-6/9,4E-6) för Långa sträckan. Gräns flöde: 45 liter/min vid 3 bar, $Q/dh > 1,3E-5 \text{ m}^2/\text{s}$, $dh: 25 + 30 \text{ m}$.

5.3 INJEKTERINGSRESULTAT BASERAT PÅ HYDRAULISKA TESTER – HYDRAULISK EFFEKT

Före den första injekteringsomgången i File hajdar-täkten, översteg de hydrauliska vidderna, b_{hyd} , generellt 90 μm med marginal, se Figur 10, där *röd* visar skattade viddar, $b_{hyd} > 430 \mu\text{m}$, *orange* visar 250–430 μm , *gul* visar ca 90–250 μm och *grön* visar $< \text{ca } 90 \mu\text{m}$. *Vit* symbol avser värden där någon vidd inte skattats då vattenförlusten för sektionen blivit negativ då den skattades genom att dra ifrån värde för underliggande sektion. Därför förväntades samtliga vattenförande strukturerna vid File hajdar-täkten vara injekterbara med det valda cementbaserade injekteringsmaterialet. Detta då det valda injekteringsmaterialet, Injektering 30, som tidigare nämnts har en kornstorleksfördelning med en d_{95} på 30 μm . Som en principiell, förenklad riktlinje, bör sprickvidden vara större än tre gånger materialets d_{95} , dvs $3 \cdot 30 = 90 \mu\text{m}$ (t.ex. Martinet 1998).

Det bekräftades att sprickvidden var större än tre gånger materialets d_{95} av bruksåtgången då den tillåtna maxvolymen, 200 liter exklusive hålfyllnad, användes, åtminstone i någon eller några sektioner, för alla borrhål för Omgång 1 i File hajdar-täkten. Tabell 3 visar andel sektioner där injekteringen avslutades för att man hade nått dessa 200 liter.

För Område 1, i revkalksten med de mest vattenförande strukturerna inom djupintervallet (sektionen) 43–52 m, avslutas 74 % av sektionerna i Omgång 1 på maxvolym. För Omgång 2 är motsvarande siffra 53 %, en minskning som följer den minskande genomsläppligheten.

Den lagrade kalkstenen, Område 2, bedömdes vara mer heterogen, med fler genomsläppliga sektioner men utan samma tydliga koppling mellan borrhålen jämfört med revkalkstenen. Område 2 hade också en större andel sektioner som avslutades på maxvolym (88 %) jämfört med Område 1. Denna heterogenitet eller variation i hydrauliska egenskaper speglades även i den andel borrhål som avslutades på maxvolym i Omgång 2 (85 %).

Tabell 3. Sektioner som avslutades på maxvolym injekteringsmaterial (generellt 200 liter exklusive hålfyllnad).

Område	Omgång 1	Omgång 2	Kontrollborrhål
Område 1 i File hajdar-täkten Revkalksten (samt underkant)	14 av 19 (74 %)	8 av 15 (53 %)	3 av 9 (33 %)
Område 2 i File hajdar-täkten Lagrad kalksten	21 av 24 (88 %)	17 av 20 (85 %)	4 av 12 (33 %)
Västra brottet Märgel	4 av 12 (ca 30%)	1 av 10 (10 %)	ej injekterade

Om man jämför genomsläpplighet för Område 1 med revkalksten med Område 2 med lagrad kalksten, Figur 13 och Figur 14, så är värdena för revkalkstenen högre (längre till höger i graf). Med ett inbördes hålavstånd på 10 m så går medianvärdet för området med revkalksten från $5\text{E-}4$ till $5,8\text{E-}5 \text{ m}^2/\text{s}$ (helhål, diverdata, ofyllda symboler) och det skulle därför vara här som nyttan med arbetet skulle vara störst.

Områdena med revkalksten och lagrad kalksten, Figur 13 och Figur 14 kan vidare jämföras med området med märgel vid Västra brottet, Figur 15. Värdena återfinns längre till vänster och var alltså lägre. Den lägre genomsläppligheten överensstämmer med den relativt sett lägre andelen sektioner som avslutades på maxvolym, injekteringsmaterial 30 %, se Tabell 3.

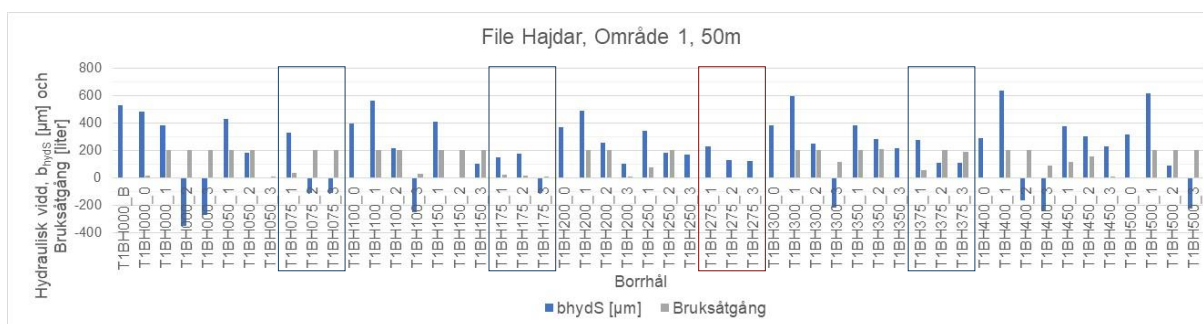
Figur 16 visar motsvarande sammanställning för både den korta och den långa sträckan vid Västra brottet. Med ett inbördes hålavstånd på 10m så går medianvärdet från $9,4\text{E-}6$ till $6,5\text{E-}6/$ (VB Långa, gröna och gula symboler). En mindre reduktion jämfört med tester för File hajdar-täkten, men fortfarande en reduktion.

Figur 17 och Figur 18 illustrerar skattad hydraulisk vidd, b_{hydS} (blå staplar) och bruksåtgång (exklusive hålfyllnad, grå staplar). Borrhålsnamn som slutar på 00 utgör Omgång 1, borrhålsnamn som slutar på 50 utgör Omgång 2 och borrhål som slutar på 75 utgör kontrollborrhålen. Som tidigare nämnts användes maxvolymen (200 liter) i flera hål, berget var alltså injekterbart med valt injekteringsmaterial. Skattad vidd är ofta större än 90 μm med den principiella, förenklade riktlinjen att sprickvidden bör vara större än tre gånger materialets d_{95} , dvs $3 \cdot 30 = 90 \mu\text{m}$ (t.ex. Martinet 1998).

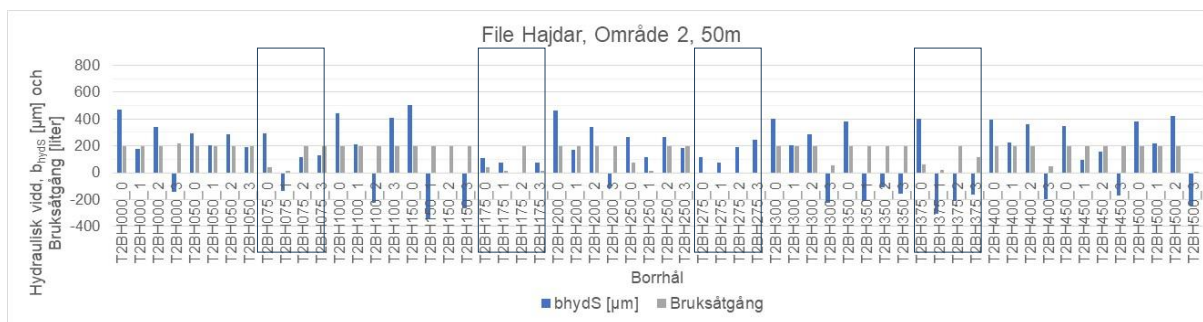
Baserat på graferna, se Figur 17 och Figur 18, kan det observeras att hydraulisk vidd i vissa fall underskattats för ytliga sektioner, se negativa staplar. Detta bedöms relatera till maxflöden för utrustning för vattenförlustmätning. Detta maxflöde observerades vara lägre för ytliga sektioner då mer slang var lindad på slangvindan och flödesmotståndet blev högre. Då ett värde för en sektion skattades genom att dra ifrån värdet för underliggande sektion kan detta resultera i ett negativt värde. Att den verkliga vidden i vissa fall sannolikt var större indikeras av att negativa blå staplar sammanfaller med maxvolym (200 liter, grå staplar).

Liknande observationer gjordes för Västra brottet, Figur 19, där hydraulisk vidd underskattades för några få, ytliga sektioner. För detta område utgjorde BH1, BH3, BH5, BH7, BH9, BH11 Omgång 1 och BH2, BH4, BH 6, BH8, BH10 utgjorde Omgång 2. För dessa borrhål observerades både lägre genomsläpplighet och mindre andel sektioner med maxvolym jämfört med områdena vid File hajdar-täkten.

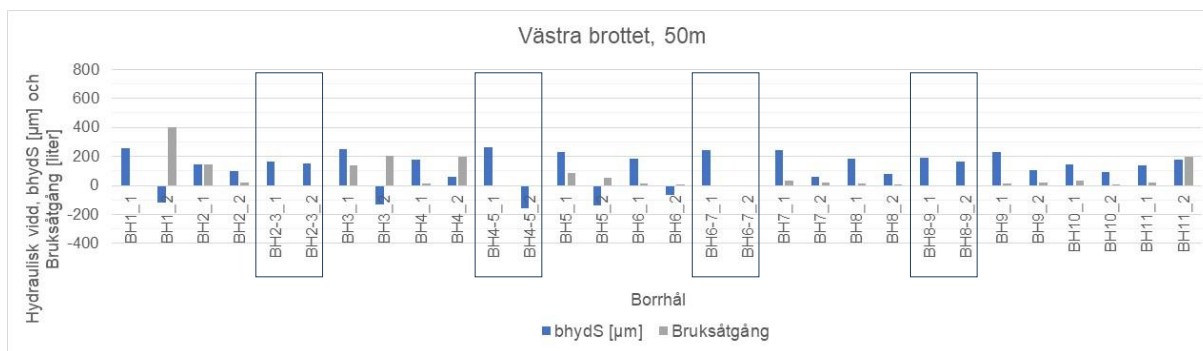
Baserat på vattenförlustmätningarna var injekteringsresultatet gott, särskilt för Omgång 1 i revkalkstenen (Område 1, File hajdar), se Figur 13. Skattningarna pekar på en reduktion för median Q/dh_{diver} efter injektering med cc 10 m på 88 %, $1-Q/dh_{cc5m}/Q/dh_{cc10m}$ (1-5,8E-5/5E-4), se median för ofyllda cirklar. Förändringen från cc10 m till kontrollhålen, dvs efter injektering med cc 5 m, skattades till 97 % (1-1,3E-5/5E-4). Den största förändringen observeras alltså för den första omgångens injektering, här med cc 10 m.



Figur 17. File hajdar, Område 1 (revkalksten inklusive underkant): Hydraulisk vidd, b_{hydS} [μm] samt bruksåtgång (exklusive hålfyllnad) [liter]. T1BH000, T1BH100 etc. – Omgång 1, T1BH050 – Omgång 2, T1BH075 – Kontroll (fyrkant). T1BH275 ej injekterat, för möjlig uppföljning.



Figur 18. File hajdar, Område 2 (lagrad kalksten): Hydraulisk vidd, b_{hydS} [μm] samt bruksåtgång (exklusive hålfyllnad) [liter]. T2BH000, T2BH100 etc. – Omgång 1, T2BH050 – Omgång 2, T2BH075 – Kontroll (fyrkant). T2BH275 ej injekterat, för möjlig uppföljning.



Figur 19. Västra brottet (margel): Hydraulisk vidd, b_{hydS} [μm] samt bruksätgång (exklusive hålfyllnad) [liter]. BH1, BH3, BH5, BH7, BH9, BH11 – Omgång 1, BH2, BH4, BH 6, BH8, BH10 – Omgång 2, BH2-3, BH4-5, BH6-7, BH8-9 – Kontroll (fyrcant), ej injekterade.

6 SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

De korta injekteringssträckorna vid File hajdar-täkten och Västra brottet hade fokus på teknisk genomförbarhet och injekterings tätande effekt. Arbetet utfördes vid tre olika 50 meter långa sträckor, varav två i anslutning till File hajdar-täkten och en vid kanten av Västra brottet. För Västra brottet utfördes även injektering för en längre sträcka där det huvudsakliga syftet främst var att minska inflödet av vatten till täkten och därigenom minska påverkan av grundvattenförekomsten. Borrhålen var vertikala, generellt 60–70 m djupa, och injekteringen utfördes i två omgångar och för olika antal nivåer.

Inledningsvis borrades för de tre olika 50-meterssträckorna ca 6 borrhål med ett inbördes hålavstånd på 10 m (Omgång 1). Spinner-flödesloggning, vattenförlustmätning och injektering utfördes. Detta följdes av borrning av fem mellanliggande borrhål (Omgång 2). För dessa utfördes vattenförlustmätning och injektering. Avslutningsvis borrades fyra kontrollhål med fokus på vattenförlustmätning och kontroll av injekterings tätande effekt. Både vattenförlustmätning och injektering utfördes med enkelmanschett och för två till fem nivåer. Flöde, Q , för sektioner skattades baserat på flöde för de olika nivåerna.

Rumslig fördelning av hydrauliska egenskaper pekade, som förväntat, på en heterogen och anisotrop bergmassa med hög horisontell hydraulisk konduktivitet, särskilt för det mest genomsläppliga området, Område 1 i File hajdar-täkten (revkalksten inklusive underkant). Flödesloggning från ca 30 m djup och nedåt identifierade tre vattenförande strukturer och bland dessa återfanns en välkonnekterad struktur på ett djup från markytan (överkant foderrör) på ungefär 50–51 m.

Vattenförande strukturer var som förväntat injekterbara med det cementbaserade injekteringsmaterialet, Injektering 30, vilket reducerade genomsläppligheten, här beskriven med specifik kapacitet, Q/dh . Den största förändringen i genomsläpplighet observerades efter den första omgångens injektering. Skattning av ändring i tryck, dh , baserat på uppmätt tryck på markytan, h_p , samt avstånd till grundvattenytan från markytan, $dh = h_w + h_p$, överskattade trycket och underskattade den specifika kapaciteten, särskilt för stora flöden. Där ändringen i tryck skattades baserat på tryck registrerat med diver, h_{diver} , samt avståndet från diver till grundvattenyta var värdena högre.

Baserat på diverdata hade Område 1 (revkalksten, revets underkant), Omgång 1 (gröna, ofyllda symboler, se Figur 13) en median för specifik kapacitet, Q/dh , på $5E-4$ m^2/s och Omgång 2 (gula, ofyllda och fyllda, se Figur 13) en median på ungefär $5E-5$ m^2/s . Efter injektering med cc 5 m var ytterligare förändring liten, ner till runt $1E-5$ m^2/s . Reduktionen i genomsläpplighet, $1-Q/dh_{cc5m}/Q/dh_{cc10m}$, för Område 1 blev baserat på ovan ungefär 88 % från Omgång 1 till Omgång 2 och ungefär 97 % från Omgång 1 till kontrollhålen. Värderna för $Q/dh/L$ för testlängden 6–70 m skulle då motsvara ungefär $8E-6$ m/s , $8E-7$ m/s respektive $2E-7$ m/s .

Utförd ridåinjektering vid File hajdar-täkten och Västra brottet visade att arbetet var tekniskt genomförbart och pekade på störst tätande effekt för Omgång 1, här med ett inbördes hålavstånd på 10 m. Om man önskar en fortsatt reduktion bör en noggrann avvägning göras mellan reduktion, omgivningspåverkan och hållbarhet. Minskad påverkan på vatten behöver vägas mot ökad användning av ekonomiska resurser, naturresurser och energi samt resulterande koldioxidavtryck och dess påverkan på klimatet.

7 REFERENSER

Dahlqvist, P., Triumf, C-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., & Schonning, K. (2017). *SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2* (Rapporter och Meddelanden 140). SGU.

Fransson, Å., Funehag, J., & Thörn, J. 2016. Swedish grouting design: hydraulic testing and grout selection. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 169(4), 275-285.

Martinet, P. 1998. Flow and clogging mechanisms in porous media with applications to dams. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

SGU, 2023. Berggrund 1:50000 - 1:250000. Hämtad 21 februari, 2023, from <https://apps.sgu.se/kartvisare/>

Witherspoon, P. A., Wang, J. S., Iwai, K., & Gale, J. E. 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water resources research* 16(6), 1016-1024.

VI ÄR WSP

WSP är en av världens ledande rådgivare och konsultbolag inom samhällsutveckling. Med cirka 55 000 medarbetare i över 40 länder samlar vi experter inom analys och teknik, för att framtidssäkra världen.

Tillsammans med våra kunder tar vi fram innovativa lösningar för en mänsklig, trygg och välfungerande morgondag. Vi planerar, projekterar, designar och projektleder olika uppdrag inom transport och infrastruktur, fastigheter och byggnader, hållbarhet och miljö, energi och industri samt urban utveckling. Så tar vi ansvar för framtiden.

wsp.com

WSP Sverige AB
Box 13033
402 51 Göteborg
Besök: Fabrikstorget 1

T: +46 10-722 50 00
Org nr: 556057-4880
wsp.com

