



Stockholm
University

Master Thesis

Degree Project in
Geology 45 hp

Utvärdering av efterinjektering med polyuretan utifrån geologiska och hydrogeologiska grundförutsättningar

Fredrik Antevik



Stockholm 2016

Department of Geological Sciences
Stockholm University
SE-106 91 Stockholm
Sweden

Sammanfattning

Syftet med detta examensarbete är att utvärdera resultatet av efterinjektering med polyuretan för att tätta punktläckage i Stockholms tunnelbana.

Inläckage är ett kostsamt och vanligt förekommande problem i bergtunnlar. Inläckage kan inte bara leda till skada på installationer i tunneln utan kan också påverka området ovanför tunneln vid en eventuell sänkning av grundvattennivån. För att lösa denna problematik finns ett flertal olika metoder som kan användas för att förebygga eller avleda inläckaget. En av de förebyggande metoderna som finns är keminjektering med polyuretanbaserade injekteringsmedel.

Detta arbete utvärderar ett tätningsförsök där åtta punktläckage injekterades i november 2015. Droppkartering av punktläckagen utfördes före och efter injekteringen för att utvärdera förändringen i läckagemängd som den medfört för att undersöka om injekteringsmetodiken lämpar sig i framtida projekt. Droppkartering pågick i ungefär ett år innan injekteringen utfördes för att undersöka läckagens naturliga variation och för att med större säkerhet kunna tolka en förändring efter injekteringen.

Utvärderingen av injekteringen visade ett bristande resultat där inget av läckagen tätades till 100 %. Endast tre av läckagen minskade i läckagemängd, fyra ökade i läckagemängd och ett resulterade i oförändrad läckagemängd. De naturliga förändringarna för utvärderingsperioden, under och efter injekteringen indikerar en naturlig höjning inducerad av ökade nederbörds mängder tillsammans med en ökande säsongsbetonad trend.

Förändringen i läckagemängd för respektive punktläckage jämfördes med parametrar avseende geologiska och hydrogeologiska grundförutsättningar för att bättre kunna förklara utfallet samt kunna fastställa vilka förutsättningar metodiken är beroende av. Sambandet var starkast med ursprunglig läckagemängd, injekteringsvolym och hydraulisk apertur och kunde bäst förklaras av polynom av andra graden. Genom att använda ekvationerna för polynomen kunde ett intervall fastställas där injekteringsmetodiken teoretiskt skulle leda till störst förminskning i läckagemängd. Osäkerheter i tolkningen finns i huvudsak en naturlig signal i injekteringsresultatet lett till korrelationen p.g.a. en inbördes koppling mellan de undersökta parametrarna.

Nyckelord: Efterinjektering, polyuretan, inläckage, dropp, utvärdering.

Abstract

The aim of this master thesis is to evaluate the results of selective post-excavation grouting with polyurethane resin in the subway of Stockholm.

Dripping and leakage of water into hard rock tunnels is a costly and commonly occurring problem. Water leakage does not only lead to damage to tunnel installation but may also affect the area above the tunnel due to lowering of the ground water table. To solve this problem there are several methods to prevent water entering the tunnel or to divert it. One of the preventing methods are to grout using polyurethane based resins.

This thesis evaluates a drip sealing project where eight point leakages were grouted during November 2015. Drip mapping was carried out before and after the grouting to evaluate the change in leakage amount to determine whether the grouting methodology is suitable for future projects. The drip mapping was carried out during a year before the sealing attempt to investigate the leakages natural variation and with greater certainty being able to evaluate the leakage change after the grouting had been carried out.

The evaluation of the grouting showed that none of the point leakages were sealed to 100 %. Only three of the leakages decreased, four increased and one showed no change. The natural variations during the evaluation period, during and after the grouting attempt indicates a natural rise in leakage amount induced by an increase in precipitation and rising seasonal trend.

The change in leakage amount for every leakage point was compared to geological and hydrogeological parameters to be able to explain the cause of the results and to determine which conditions the methodology depends on. The correlation with original leakage amount, grouting volume and hydraulic aperture were the strongest and could best be explained by second degree polynomials. By using the equations for the polynomials an interval could be determined where the grouting methodology theoretically would lead to the greatest decrease in leakage amount. There are some uncertainty in the interpretation whether a natural signal in the grouting results led to a correlation due to an internal coupling between the parameters.

Keywords: Post-excavation grouting, polyurethane, leakage, dripping, evaluation.

Innehåll

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Inledning | 1 |
| 1.1 | Bakgrund | 1 |
| 1.2 | Syfte..... | 2 |
| 1.3 | Geologi | 2 |
| 1.3.1 | Sprickbildning i berggrund..... | 3 |
| 1.3.2 | Bergmassans kvalitetsklassificering | 4 |
| 1.4 | Hydrogeologi..... | 5 |
| 1.4.1 | Grundvattennivåer och provpumpning | 6 |
| 1.5 | Tätningmetoder, tätningemedel och avledande metoder | 6 |
| 1.5.1 | Förinjektering | 7 |
| 1.5.2 | Dräner | 7 |
| 1.5.3 | Dropplåtar och droppkoppar..... | 7 |
| 1.5.4 | Droppsprutning med kemiska tillsatsmedel | 8 |
| 1.5.5 | Efterinjektering | 8 |
| 2 | Metod och utförande..... | 9 |
| 2.1 | Förinspektion och droppkartering | 9 |
| 2.2 | Mätning av grundvattennivåer..... | 10 |
| 2.3 | Injektering | 10 |
| 2.4 | Vattenförlustmätning | 12 |
| 2.5 | Berggrundskartering och bergkvalitetbestämning..... | 12 |
| 2.6 | Statistisk utvärdering..... | 12 |
| 2.6.1 | Regressionsanalys | 12 |
| 2.6.2 | RMSE..... | 13 |
| 2.6.3 | Minimivärde för ett andragradspolynom | 13 |
| 3 | Resultat..... | 14 |
| 3.1 | Droppkartering | 14 |
| 3.2 | Förändring i läckagemängd och grundvattennivåer | 15 |
| 3.3 | Transmissivitet och hydraulisk apertur..... | 22 |
| 3.4 | Injekteringsutförande och total läckageförändring | 24 |
| 3.4.1 | Läckagepunkt 7+453..... | 24 |
| 3.4.2 | Läckagepunkt 7+490..... | 25 |
| 3.4.3 | Läckagepunkt 7+618..... | 26 |
| 3.4.4 | Läckagepunkt 8+062..... | 27 |
| 3.4.5 | Läckagepunkt 8+173..... | 28 |
| 3.4.6 | Läckagepunkt 8+372..... | 29 |
| 3.4.7 | Läckagepunkt 10+440..... | 30 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.4.8 | Läckagepunkt 10+831 | 31 |
| 3.4.9 | Förändring i läckagemängd | 32 |
| 3.5 | Geologisk kartering och bergkvalitet | 38 |
| 3.5.1 | Granit | 38 |
| 3.5.2 | Gnejs | 39 |
| 3.5.3 | Gabbro | 41 |
| 4 | Diskussion | 43 |
| 4.1 | Naturliga variationer i läckagemängd | 43 |
| 4.1.1 | Injekterade läckage | 43 |
| 4.1.2 | Ej injekterade läckage i Frescati | 45 |
| 4.2 | Injekteringsresultat | 45 |
| 4.2.1 | Koppling till grundförutsättningar och utförande | 47 |
| 5 | Slutsats | 49 |
| 6 | Referenser | 52 |
| | Appendix A: Droppkartering | 54 |
| | Appendix B: Grundvattennivåer | 56 |
| | Appendix C: Bergkvalitet | 57 |
| | Appendix D: Injektering | 58 |

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vattenläckage i tunnlar är ett vanligt förekommande och kostsamt problem. Fukt, dropp och rinnande vatten påträffas ofta, både i nyuttagna bergmassor och i äldre etablerade tunnelkonstruktioner. Detta innebär bara inte ett problem för trafik och människor som ska röra sig i tunneln men också för de fasta installationer som har en viss förväntad livslängd. Korrosion, erosion, uppdämning och frysningsproblem är några av de problem som uppstår av vattenflöden och utfällningar som bildas. Olika bergtekniska lösningar har utvecklats för att täta berget eller leda om och kontrollera vattenflödena (Andersson, 2000). En annan sida av inläckageproblemet är att det kan leda till sänkning av grundvattennivåerna ovanför tunneln vilket kan leda till sinade brunnar, miljöpåverkan och skador på byggnader p.g.a. sättningar. Projekt Hallandsås är ett exempel på detta (Waltham, 2009).

För att hantera inläckage används ett antal förebyggande och avledande metoder. Förinjektering sker generellt systematiskt i dagens tunnelbyggen. Ett antal hål borrar snett utåt där det tänkta berguttaget ska ske. Dessa hål injekteras sedan under höga tryck med antingen cementbaserade eller kemiskt baserade injekteringsmedel vars uppgift är att fylla de spricksystem som finns i berget och bilda en vattentät skärm runt den blivande tunnelvolymen. Efter detta tas bergmassan ut genom sprängning och schaktning. Trots att förinjektering gjorts räcker oftast inte det för att möta de höga täthetskrav som ställs från beställarna (Andersson, 2000; Trafikverket, 2011). Täthetskraven brukar röra sig runt 1-10 liter vatten per minut och hundra meter tunnel. Fukt, dropp och även rinnande vatten är att förvänta sig i detta skede i bygget. För att åtgärda detta görs ibland efterinjektering för att täta så mycket av de återstående- eller nya sprickor som bildats vid arbete och sprängning. Efterinjekteringen utförs ofta selektivt efter observationer och hydrauliska tester. Man borrar hål in i tunnelväggen eller tunneltaket och injekterar injekteringsmedlet som i detta fall oftast är av kemisk typ. Huruvida effektiv efterinjektering är har diskuterats med varierande slutsatser, dels mellan studier, men också mellan olika metoder och injekteringsmedel. Den allmänna uppfattningen verkar ändå vara att metoden minskar inläckage till olika grad (Fransson & Gustafson, 2006).

Förutom injektering som tätningsmetod, så används även dräner i stor utsträckning. Dräner används för att leda bort och ner vattnet från tunnelns tak och väggar till dräneringsbrunnar som oftast går utmed tunnelnars sidor. Dränernas utformning varierar beroende på generation och tillverkare men är generellt uppbyggda av ett tätt plastmembran, tät plastfilm eller tjockare polyetenmattor som är fästa i berget och sedan täckta med sprutbetong. Dräner fungerar ofta effektivt och som förväntat men utgör en stor kostnad vid tunnelbyggnation och skulle därför användas i mindre utsträckning om andra mer kostnadseffektiva metoder kunde möta täthetskraven (Hargelius, 2006). Som billigare avledande metod används dropplåtar och droppkoppar. Dropplåtar består av korrugerad plast som fästs i berget och leder vattnet mot sidorna av tunneln. Droppkoppar fungerar på liknande sätt men består av plastlådor som fångar upp vattnet, som sedan leds via en slang ner mot sidan. Problematiken med dessa billigare metoder är att de tappar sin funktion då läckage förflyttar sig samt att inspekterbarheten av tunnelns bärande huvudsystem försämras.

En metod som börjat användas i mindre utsträckning är droppsprutning. Detta innebär att täta läckage selektivt och punktmässigt i efterhand. Sprutbetong blandat med ett kemiskt tillsatsmedel appliceras på ytan som läcker. Tillsatsmedel produceras av flera tillverkare och ska enligt dem själva agera självtätande i kontakt med vatten varvid medlet ska kristallisera på ytan och i sprickan som läcker. Tillsatsmedlen ska också kunna tillsättas i den primära sprutbetongen vilken då ska fungera som en tät liner i tunneln (Penetron, 2015; Xypex, 2015).

För att med säkerhet veta hur väl dessa metoder fungerar krävs noggrann utvärdering av deras funktion i verkliga situationer. Resultatet kan sedan användas för beslut om nya metoder eller för att utveckla de befintliga. Utvärderingar av en methods utfall görs ofta inte p.g.a den ekonomiska aspekten, vilket också kan leda till att utlåtanden för huruvida en metod fungerar eller inte innehåller viss subjektivitet.

1.2 Syfte

Detta examensarbete på avancerad nivå vid Stockholms Universitet är skrivet för konsultföretaget Bergab, som i uppdrag av Trafikförvaltningen/SL vill utvärdera en alternativ tätningsmetod som skulle kunna ersätta tidigare läckagehanterande metoder. Examensarbetet är handlett av Joakim Mansfeld, PhD, Stockholms Universitet och av Fredrik Östling, Bergab.

Syftet med arbetet är att utvärdera effektiviteten hos efterinjektering med det polyuretanbaserade injekteringsmedlet Carbopur. Detta för att avgöra till vilken grad tätningsmetoden fungerar och därmed är lämplig att tillämpa vid framtida åtgärder. Ett antal utvalda platser på röda linjen i Stockholms tunnelbana där läckage förekommit har studerats före, under och efter tätningsåtgärd för att kunna analysera och kvantifiera resultatet av tätningsförsöket. I utvärderingen innefattas grundförutsättningarna för de åtgärdade läckagen avseende läckagevolym över tid, geologi och hydrogeologi som ska användas för att dels fastställa vilken förändring i läckagemängd tätningsförsöket resulterar i, men också utvärdera vilka geologiska, hydrogeologiska och bergtekniska parametrar resultatet är beroende av.

1.3 Geologi

Berggrunden i Stockholmsområdet bildades i den Svekofenniska orogenesisen ca 1,9 Ga i en serie av subduktionshändelser. Denna berggrundenhet utgör också mellersta östra Sverige, norra Sverige samt större delar av Finland. Berggrunden består främst av sedimentära och magmatiska litologier som genomgått metamorfos. Marina shelfsediment med blandade kornstorlekar från lera till sand utgör idag de sedimentära litologierna i form av gråvackor och skifferar. Syn- till posttektoniska intrusioner av granitisk till dioritisk sammansättning utgör en stor del av de magmatiska enheter som vi ser idag. Dessa har orsakat kontaktmetamorfos och uppsmältning av de sedimentära litologierna vilket har bildat migmatiter, metamorfa bergarter med hög omvandlingsgrad samt metasomatiska bergarter med sekundära mineraliseringar (Stephens, 2009).

Regional metamorfos och tektonik har omvandlat och omformat berggrunden på stor skala. Sekundära mineral har bildats i samband med att berggrunden genomgått spröd- och plastisk deformation som också gett den sin delvis uppspruckna respektive veckade

karaktär (Gustafson, 2009). Subduktionsriktningen under orogenesisen var till en början i nord-västlig riktning men vred sig sedan till nord-östlig (Nironen, 1997). Det är också i nord-östlig riktning vi idag finner den största in situ spänningen i den centrala Fennoskandiska berggrunden som är avgörande för i vilken riktning sprickor bildas, hur markrörelser sker idag och hur hållfast berget är (Stephansson et al., 1991; Martin, 2007).

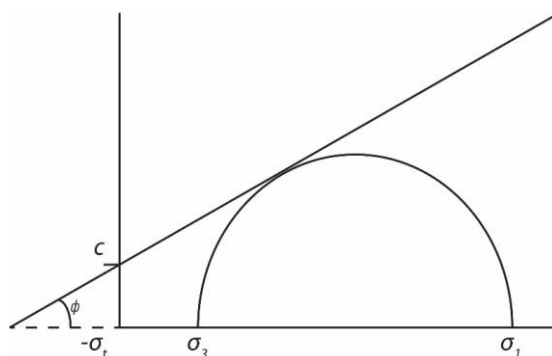
1.3.1 Sprickbildning i berggrund

Sprickor i berggrunden kan bildas på flera sätt och i flera olika generationer. Den tidigaste generationen sprickor uppkommer i magmatiska bergarter då magma eller lava svalnar vilken leder till volymminskning och krympningsprickor, speciellt där den nybildade bergmassan har heterogena svagheter. Sprickor uppkommer också i samband med orogenes då berggrunden deformeras plastiskt och sprött beroende på djup och temperatur. Detta leder till både sprickor, förkastningar och krosszoner då bergenheter kan skjuvas mot varandra. De glaciationer som tidigare förekommit i Sverige har eroderat bort en stor bergvolym från ytan vilket lett till en substantiell tryckavlastning. Genom att detta ändrar vertikalspänningen så utvecklas horisontella sprickor i berggrunden som gör den mindre motståndskraftig för kommande erosion. Glaciationerna gör också att litosfären trycks ner i den plastiska manteln p.g.a. inlandsisens tyngd. När sedan isen smält bort vill litosfären flyta upp igen vilket kan ge upphov till sprickor och rörelser utmed förkastningar. Glaciation resulterar också i att sprickor bildas genom isens rörelse på underliggande berg samt genom temperatur- och tryckförändring p.g.a. rådande klimats respektive grund- och ytvattenflöden. På kortare tidsskalor är erosion och vittring de två främsta faktorerna vilka kan ge upphov till ytliga sprickor (Gustafson, 2009).

Spänningar som berget utsätts för regionalt eller lokalt resulterar antingen i veckning (vid högre temperaturer) eller i skjuvbrott (vid lägre temperaturer) beroende på rådande temperatur och tryck. För att beskriva skjuvbrott i ett sprött berg används oftast Mohr-Coloumbs brottvillkor:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

där c är kohesionen hos materialet, σ är normalspänningen och ϕ är den inre friktionsvinkeln. Detta innebär att ett brott i berget uppstår när radien av $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ tangerar den brottenvelop (τ) som definieras av friktionsvinkeln och c (se figur 1) (Davis m.fl., 2012).



Figur 1. Mohr-Coloumbs brottvillkor. Bergbrott uppstår då cirkeln som definieras av skillnaden mellan σ_1 och σ_3 går över envelopen som definieras av den inre friktionsvinkeln (ϕ), kohesionen (c) hos berget samt rådande spänningsförhållanden (σ).

1.3.2 Bergmassans kvalitetsklassificering

För att kunna utvärdera kvaliteten på berggrunden har ett antal klassificeringssystem utvecklats. De är beroende av ett antal definierade parametrar hos berggrunden.

RQD står för "Rock Quality Designation" och utvecklades av Deere (1968) och Franklin et al. (1971) för att kunna utvärdera hur pass uppsprucket och stabilt berget är för tunnelbyggnationer. Ekvationen för RQD är formulerad som ett förhållande mellan summan av borrhärnlängder över tio cm som inte har sprickor och den totala längden för borrhärnan:

$$RQD = \sum(\text{sprickfria kärnlängder} > 10\text{cm}) \cdot \frac{100}{\text{total borrhärnelängd}} \quad (2)$$

Resultande värde ligger mellan 0 och 100 där värden över 70 oftast tyder på en bra kvalitet.

RMR utvecklades av Bieniawski (1989) för gruvverksamhet och innehåller sex stycken parametrar:

$$RMR = IRS + RQD + \text{Sprickavstånd} + \text{Sprickegenskaper} + \text{Grundvattenflöde} + \text{Justeringsvärde} \quad (3)$$

där **IRS** (Intact rock strength) är ett mått på hur stor kraft i MPa en bergart måste utsättas för innan den går sönder. Detta kan testas i laboratorier där provet utsätts för spänning i en enskild riktning men oftast räcker det med ett fälttest genom slag eller skrapning med hammare.

RQD (se ekvation 2)

Sprickavstånd är det genomsnittliga avståndet mellan bergmassans sprickor i meter.

Sprickegenskaper är sprickans ytjämnhet samt vittringsgrad. Låg ytjämnhet samt låg vittringsgrad ger högre värden.

Grundvattenflöde bedöms utifrån inflödet av vatten per tio meter tunnallengd samt vattentrycket i sprickorna i förhållande till högsta principiella bergspänning.

Justeringsvärde definieras utifrån vilken riktning sprickorna är i förhållande till den konstruktion (tunnel, husgrund etc.) som ska byggas.

Resultande värde ligger mellan 0 och 100 där 100 innebär högsta kvalitet.

Q-systemet utvecklades av Barton m.fl. (1974) och ger ett kvalitetsvärde av bergmassan genom följande formel:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (4)$$

Där **RQD** (se ekvation 2)

J_n representerar antalet sprickgrupper.

J_r representerar sprickornas råhet.

J_a representerar sprickans fyllnadsmassa.

J_w representerar det aktuella vattenflödet.

SRF (Stress reduction factor) representerar spänningminskningsfaktorn vid tunneldrivning.

Det resulterande Q-värdet ligger mellan 0,00006 och 2666 där värden över 40 innebär mycket god bergkvalitet för bergmassan.

1.4 Hydrogeologi

Eftersom berggrunden i Sverige i stor utsträckning är kristallin och har låg genomsläpplighet jämfört med jordar och sedimentära bergarter, styrs vattenflödena i berget till sprick-, krosszoner och kontaktytor som är mer permeabla. Sprickorna utvecklas i svaghetszoner i berget där hållfastheten varit lägre än omgivande berggrund. Eftersom berget är heterogent och därmed bryts upp på olika sätt varierar oftast sprickvidden, även kallad aperturen, utmed ett sprickplan. Sekundära mineral, utfällningar och mindre sprickor leder också till högre ojämnheter. Detta innebär att flödes hastigheten varierar utmed sprickan och man definierar oftast en genomsnittlig hydraulisk apertur för att kunna förklara flödet (Gustafson, 2009).

Berg som deformeras plastiskt har generellt låga vattenflöden eftersom mineralerna i bergarten omkristalliserats och därmed anpassat sig till de rådande spänningsförhållandena istället för att anpassa sig genom heterogen uppsprickning. Deformation vid höga temperaturer innebär ofta även flöden av metamorfa fluider som kan leda till utfällning av nya mineral i sprickor och därmed göra berget mindre permeabelt (Davis m.fl. 2012).

Flödet i en spricka anses vara laminärt och styrs proportionellt av gradienten hos grundvattnet som kan förklaras med Darcys lag (Gustafson, 2012):

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \rightarrow -\frac{dh}{dl} \cdot K \quad (5)$$

där **q** är det specifika flöde.

Q är flödesmängd.

A är flödesarea.

K är hydraulisk konduktivitet.

dh/dl är grundvattnets gradient.

Flödet i berget varierar beroende på flödeskanalernas geometri. För att förenkla kan en genomsnittlig tredimensionell konduktivitet för ett bergblock av en viss area beräknas. I verkligheten är flödeskanalerna snarare tvådimensionella eftersom de är plana strukturer. Flödet kan också vara endimensionellt vid fall då det är mer eller mindre avgränsat över planet p.g.a. varierande apertur.

Hur väl berget släpper igenom vatten definieras av ett transmissivitetsvärde som är direkt proportionellt mot den hydrauliska konduktiviteten samt tjockleken på det vattenmättade horisontella lager som vattnet flödar igenom. I berg är flödet koncentrerat till sprickor eftersom genomsläppligheten i övrigt är i princip obefintlig. Transmissiviteten kan bestämmas genom en så kallad vattenförlustmätning där man injekterar vatten i ett borrhål genom en tätande manschett. Följande formel kan användas:

$$T = \frac{Q\rho g}{2\pi\Delta p} \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{L}{2r_w}\right) \right] \quad (6)$$

där **T** är transmissivitet.
Q är flödesmängd.
ρ är vattnets densitet.
g är gravitation.
Δp är drivningstrycket över grundvattentrycket under mätningen.
L är borrhålets längd.
r_w är borrhålets radie.

Vid en jämförelse mellan felsiska och mafiska bergarter så har felsiska bergarter generellt högre transmissivitet. Detta beror på lägre elasticitetsmodul hos mafiska bergarter vilket gör dem mer elastiska under spänning än felsiska. Felsiska bergarter har även lägre hållfasthet vilket lättare resulterar i brott (Davis et al. 2012). En annan faktor som styr genomsläppligheten är bergtäckningen. Större bergtäckning leder till större spänningar och därmed mindre aperturer. Vid ytan sker också kraftigare vittring i form av kemisk upplösning av sprickfyllnader samt mekanisk vittring genom t.ex frostsprängning (Gustafson, 2009).

1.4.1 Grundvattennivåer och provpumpning

Grundvattennivåerna varierar generellt över året tillsammans med nederbörd och temperatur. Högst grundvattennivåer finner man oftast under våren eftersom ackumuleringen av nederbörd i form av snö generellt varit hög under vintern tillsammans med att temperaturen varit låg. Den låga temperaturen gör att mindre av nederbörden avdunstar och istället infiltreras ner i marken där grundvattennivåerna höjs (Dingman, 2002).

Vid mätning av grundvattennivåer placerar man grundvattenrör i det område man är intresserad av. Grundvattenrören placeras på ett djup som bestäms av platsens naturliga förutsättningar. Variationen av grundvattennivån vid olika djup kan skilja sig eftersom permeabiliteten i marken varierar med geologin som avgränsar så kallade grundvattenmagasin. På grund av Sveriges glaciala lagerföljder placeras ofta grundvattenrören i ett övre och under magasin som avgränsas av ett impermeabelt lager i form av en kohesionsjord. Över och under detta lager finns det oftast geologiska enheter med en större friktionsjordkomponent i form av sand, grus och sten där grundvattnet lättare kan flöda och förändras i nivå. I dessa permeabla lager är det därför lämpligt att mäta grundvattennivån. Grundvattenrör för undre magasin sätts ned till bergytan medan rör för övre magasin sätts ned till djupet för det mer impermeabla lagret (Dingman, 2002).

För att undersöka ett områdes transmissivitet och konduktivitet kan man utföra en provpumpning. Vatten pumpas ur en brunn samtidigt som grundvattennivåerna i omgivningen mäts i grundvattenrör. Beroende på hur grundvattennivåerna svarar på den mängd vatten som pumpats ut över en viss tid kan man numeriskt fastställa de hydrogeologiska parametrarna (Dingman, 2002).

1.5 Tätningmetoder, tätningemedel och avledande metoder

Vid konstruktion av tunnlar idag ställs det ofta höga täthetskrav av uppdragsgivarna. Dels för att säkerställa tunnels framtida integritet gällande installationer och bärande

system, men också för skydda miljön ovanför bergmassan då grundvattensänkningar kan innebära stora konsekvenser för omgivningen. För att täta bergmassan och förhindra läckage har ett antal tekniska metoder utvecklats. Vissa har visat sig mer effektiva än andra gällande både funktion och ekonomi (Andersson, 2000).

1.5.1 Förinjektering

Förinjektering sker oftast systematiskt vid tunnelbyggen. Innan man spränger ut en bergmassa vid tunnelkonstruktion borrar man en serie hål snett utåt från där det tänkta bergguttaget ska ske. Dessa hål injekteras sedan med ett cementbaserat injekteringsmedel vars uppgift är att fylla och täta de sprickor som finns i berget och skapa en tät skärm runt den blivande tunneln. Cementen som injekteras har relativt stor kornstorlek och ligger ofta runt 30 μm . Cementinjekteringen är partikelsuspenderad och definieras därför reologiskt som en binghamvätska (Dalmalm, 2004). Generellt kan cementet penetrera och täta sprickor som är tre gånger större än partikelstorleken och kan därför täta sprickor upp till cirka 0,1 mm (Butron m.fl. 2010). För att nå ett bra injekteringsresultat för alla typer av injektering ska injekteringsmedlet ha djup penetration, god sprickfyllnad samt härda snabbt utan att krympa (Dalmalm, 2004).

1.5.2 Dräner

Som annat alternativ eller lösning på läckage då inte för- och efterinjektering räckt till används vanligtvis dräner. Detta är den effektivaste lösningen för att garantera avledning av inläckande vatten och den används i stor utsträckning. Om tätning genom injektering skulle vara lika effektivt skulle kostnaderna för läckagehantering kunna minsta avsevärt. Den vanligaste uppbyggnaden av en drän består av någon typ av distans mot berget följt av isolering, tätmembran och sprutbetong. Dock finns det flera olika varianter av dessa. Tätmembranet är ofta konstruerat för att även agera som isolering i form av en polyetenmatta eller liknande. Dränmattorna fästs vanligtvis i berget med plattjärn och expanderbult, och täcks sedan med sprutbetong som agerar brandskydd. Vid breda dräner förstärks även sprutbetongen med bult. Sprutbetongen består oftast av tre lager varav de två första består av armerad sprutbetong och det sista utan armering. En komplett installerad drän bygger på drygt 20 cm från tunnelns tak eller vägg. Dräner kan installeras antingen selektivt för att täcka smala ytor eller systematiskt då de skarvas och täcker större delar av en tunnel (Hargelius, 2006).

1.5.3 Dropplåtar och droppkoppar

Droppskydd används för att leda bort vatten som läcker in genom tunnelns tak till sidan av tunneln. Dropplåtarna består av korrugerad plast som installeras med lång gängad bult ca 0,5 meter under tunneltaket. Plåtarnas syfte är att leda bort läckaget från installerade komponenter på tunnelns golv, till vanligtvis makadamen ut mot tunnelväggen. Fördelen med plåtarna är att de är billiga i materialkostnad. Nackdelen med dropplåtarna är att de förhindrar inspektionsmöjligheten av tunneltaket vilket krävs enligt TRVK 11 (Trafikverket).

Droppkoppar fungerar avledande precis som dropplåtar men täcker en mindre yta av tunneltaket. De består av en grå fyrkantig plastlåda som är cirka 40x40 cm. Läckaget fångas upp i plastlådan och leds ned utmed tunnelväggen i en slang till tunnelgolvet. Droppkopparna är känsliga för mindre förflyttningar av läckaget p.g.a. deras begränsade uppfångningsyta.

I många fall innebär droppskydden att läckageproblemet kvarstår i tunnelbanan då vattnet avletts mellan kabelstege på (tunnelns vägg) och strömskenan (cirka 1,5 meter från väggen) och stänker på strömskenan när det träffar makadamen.

1.5.4 Droppsprutning med kemiska tillsatsmedel

Droppsprutning är en metod där ett tillsatsmedel blandas i sprutbetongen som sedan sprutas i tunneln. Detta kan antingen göras systematiskt i hela tunneln eller selektivt i efterhand där läckage uppstått. De vanligaste tillsatsmedlen heter Penetron och Xypex och ska agera självtätande vid kontakt med vatten genom att kristallisera i sprickor och tomrum i betongen (Penetron, 2014; Xypex, 2014). Fördelen med denna metod är att den inte kostar så mycket och inte innebär särskilt mycket extra arbete. Dock så är det aningen oklart hur effektiv metoden är då läckage uppstått i efterhand vid användning av denna metod.

1.5.5 Efterinjektering

Tätning av större sprickor genom förinjektering med cement räcker ofta inte för att möta täthetskraven. Förinjekteringen kan inte täta de mindre sprickor som finns vilket kan leda till att flödet i de större sprickorna leds om till dessa (Gustafson, 2009). För att täta mindre kvarstående sprickor krävs kemiska injekteringsmedel. Dessa är inte partikelsuspenderade utan klassificeras som flytande newtonvätskor och beter sig därför som vatten innan härdning. De är ofta kiselbaserade och har betydligt kortare härdningstid än de cementbaserade injekteringsmedlen (Butron m.fl. 2010). Eftersom efterinjekteringen sker efter tunnelvolymen är urtagen och på mindre djup in från tunnelväggen eller tunneltaket kan man inte injektera med lika högt tryck som vid förinjektering då detta kan medföra risk för utfall och återflöden tillbaka in i tunneln. Den här typen av injektering sker oftast selektivt vid behov under konstruktionsfas och underhållsfas (Fransson & Gustafson, 2006).

1.5.5.1 Polyuretanbaserade injekteringsmedel

En typ av kemiska injekteringsmedel är de polyuretanbaserade. Dessa hör till gruppen härdplaster och är inte vattenlösliga. Polyuretanet bildas genom polymerisering av isocyanat och polyol. Medlen finns i enkomponent- och tvåkomponentvarianter som båda reagerar polymeriserande vid kontakt med vatten och bildar ett kemiskt inaktivt hårt skum. I enkomponentsvarianterna prepolymeriseras (förreageras) isocyanaterna och polyolen vid tillverkning vilket gör dem mindre reaktiva och därmed mer miljövänliga (Arbetsmiljöverket, 2014). Andra fördelar med prepolymerisering är att mindre värme avges vid den slutgiltiga härdningen vilket innebär att reaktionstiden lättare kan kontrolleras. Viskositeten ökar något med prepolymeriseringen och vid högre temperatur vilket kan vara negativt för att uppnå maximal inträngning. Vid härdningen bildas koldioxid som leder till volymökning samt ska driva medlet djupare in i injekteringszonen (Andersson, 1999).

Carbopur är ett tvåkomponentsbaserat polyuretanbaserat injekteringsmedel. Dess komponenter benämns Komp. A som består av polyol respektive Komp. B som består av isocyanat. Komp. A finns i fyra olika varianter som resulterar i olika härdningstider (se tabell 1). Härdningstiden går ned med ökande temperatur. Vid kontakt med vatten bildas mer koldioxid och medlet får högre skumningsfaktor. Oavsett vilken variant av Komp. A som används blandas medlet i förhållande 1:1 med Komp. B. Under

injektering kan härdningstiden kortas ned med accelerator CarboAdd när önskad spridning uppnåtts (Minova, 2015).

Tabell 1. Härdningstider samt skumfaktorer för respektive variant av Komp. A med eller utan tillgång till vatten.

| Komp. A | Egenskaper | Reaktion vid 25°C | |
|--------------|------------------------|-------------------|-----------------------------|
| | | Utan vatten | Med vatten |
| Carbopur WX | Långsam reaktion | 3 timmar | 6,5 min. Skumfaktor 1-3. |
| Carbopur WF | Snabb reaktion | 60 sek. | 2 min. Skumfaktor 3. |
| Carbopur WFA | Väldigt snabb reaktion | 35 sek. | 70 sek. Skumfaktor 3-15. |
| Carbopur WT | Omedelbar reaktion | Omedelbar | 40 sek. Skumfaktor 1-2. |

2 Metod och utförande

2.1 Förinspektion och droppkartering

För att lokalisera potentiella platser för studien gjordes en inspektion på röda linjen i Stockholms tunnelbana. Sträckorna Mörby centrum-Östermalmstorg och Slussen-Liljeholmen inspekterades okulärt för att lokalisera läckage som medfört skada på installationer och därmed var lämpade för åtgärd. Läckagen som identifierades droppkarterades och avståndsmarkeringen utmed spåret noterades. Delsträckorna Mörby centrum-Danderyds sjukhus och Bergshamra-Universitetet visade sig vara mest utsatta samt att läckagen var av varierande karaktär med avseende på läckagemängd. Detta ansågs lämpligt eftersom en utvärdering av tätningsmetoden blir mer tillämpbar då grundförutsättningarna är olika.

Delsträckorna utgörs av bergtunnlar förstärkta med oarmerad sprutbetong, oftast halvvägs ned på väggen men även ned till golv vid avsnitt där berget varit sämre. Tjockleken på sprutbetongen varierar mellan cirka en till tio centimeter. Dräner har installerats i stor utsträckning och utgörs av cirka 40 cm breda isoleringsmattor täckta i plastfilm som fästs i berget och täckts med sprutbetong.

19 punktläckage valdes ut (se figur 2) och droppkarterades i cirka ett års tid innan keminjektering utfördes. Detta gjordes för att se hur läckagen varierade naturligt i förhållande till nederbörd, grundvattennivåer samt lufttemperatur. Droppkarteringen utfördes genom att räkna antalet dropp under en minuts tid med hjälp av timer. Färre dropp än ett dropp per minut kategoriserades som fukt och fler dropp än vad som var möjligt att räkna kategoriserades som rinnande. Genom att droppkartera före och efter själva tätningsförsöket utfördes kunde förändringar i läckagemängd uppskattas och därmed fastställa hur metoden fungerat.

Utöver droppkartering av de punktläckage som injekterades karterades även samtliga övriga inläckage i form av fukt, dropp och rinnande, tio meter åt vardera håll i tunneln

med borrhög med borrhög. Antal hål som borrades vid varje läckageplats varierade mellan ett till tre och berodde på om aktuell vattenförande spricka träffades. Där vattenförande spricka träffades och det var möjligt att injektera utfördes injektering. Om drän påträffades valdes att inte injektera då det finns risk att fylla dränen med injekteringsmedel varvid denna kan falla ut. Total mängd injekteringsmedel som användes var 268 liter. Variant av Komp. A som användes var uteslutande Carbopur WX. Se appendix D för tekniska detaljer för respektive läckagepunkt.

Tabell 2. Översikt över när respektive arbetsmoment utfördes under injekteringsperioden, v. 46-47. Förkortningarna står för följande: B-Borring, VF-Vattenförlustmätning, I-Injektering.

| Delsträcka | Kilometertal | Mån 9/11 | Tis 10/11 | Ons 11/11 | Tor 12/11 | Fre 13/11 | Mån 16/11 | Tis 17/11 | Ons 18/11 | Tor 19/11 | Fre 20/11 |
|---|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Universitetet- Bergshamra | 7+453 | B | | | VF+I | | | | | | |
| | 7+490 | B+VF | | | | | I | | | | |
| | 7+536 | | B+VF | | | | | | | | |
| | 7+618 | | B+VF | | | | I | | | | |
| | 7+797 | | | | | | | | | B+VF | |
| | 8+062 | | | | | | | | B+VF | I | |
| | 8+173 | | | | | | | B+VF | I | | |
| | 8+372 | | | | | | | B+VF | I | | |
| Danderyds sjukhus- Mörby centrum | 10+440 | | | B+VF+I | | | | | | | |
| | 10+831 | | | | | | | | | | B+VF+I |

Metodikerna för injekteringen var enligt följande:

1. Ett 3 meter långt, 45 mm hål borrar snett mot tunnelytan med mål att skära vattenförande spricka. Borrinkel mot tunnelkonturen får inte understiga 30° p.g.a. risk för spjälkning.
2. Vattenförlustmätning utförs för att tyda om hålet är i kontakt med läckagepunkt. Om kontakt ej uppnås borrar ett nytt hål som vattenförlustmäts.
3. Om fler hål borrar som ej varit i kontakt med läckage pluggas dessa med packer som lämnas i hålet, alternativt med textil som doppas i injekteringsmedel.
4. Manschett med manometer placeras i hålet som är i kontakt med läckagepunkt. Denna lämnas tills jämvikt inställt sig och grundvattentryck kan avläsas.
5. Injekteringsmanschett placeras i hålet. Injektering utförs tills erforderliga stoppkriterier uppnåtts (se nedan).

Stoppkriterier var enligt följande punkter:

- Injekteringsstryck på pumpen närmar sig 15 MPa.
- Utfall av berg eller sprutbetong sker.
- Stor volym injekteringsmedel har injekterats (beslut enligt "active design").

Eftersom det blir stora friktionsförluster i injekteringsutrustningen är ungefärligt injekteringsstryck i berget cirka 10 kPa.

Efter härdningstiden är uppnådd utförs hålfyllning av borrhålet utanför använd kvarlämnad injekteringsmanschett. Vid läckande borrhål används engångspacker och polyuretan för hålfyllnad, annars används cement. Injekteringsarbetet pågick under en

tvåveckorsperiod under v. 46-47, 2015 (tabell 2), men efterföljdes av kompletterande injekteringsfaser som faller utanför ramarna för detta examensarbete. Vid efterföljande injekteringsfaser utfördes hållfyllnad.

2.4 Vattenförlustmätning

Vid tio av läckagepunkterna utfördes vattenförlustmätningar. Utifrån dessa kunde transmissivitet och hydraulisk apertur räknas ut för varje läckage vilket kunde användas som analytiska parametrar vid utvärderingen.

Vattenförlustmätningen gjordes genom enkelmanschett, 43 mm i diameter. Hålen borrades generellt 3 meter men varierade något beroende på lokala förutsättningar. Detta avgjorde även hur långt in manschetten placerades i borrhålen och därmed hur långt hålets mätlängd blev. Vattenförlustmätning utfördes i 2 minuter vid cirka 200-500 kPa tryck. Se appendix D för detaljer kring varje vattenförlustmätning och borrhål.

För beräkning av transmissivitet användes ekvation 6 som kan användas för att beräkna transmissiviteten för ett borrhålsintervall. För beräkning av motsvarande hydraulisk apertur (Gustafsson, 2009) för angiven transmissivitet användes följande ekvation:

$$b = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \mu \cdot T_f}{\rho \cdot g}} \quad (7)$$

där **b** är hydraulisk apertur.
 μ är viskositet för vatten.
 T_f är beräknad transmissivitet.
 ρ är densitet för vatten.
g är gravitation.

2.5 Berggrundskartering och bergkvalitetbestämning

Berggrundskartering gjordes vid samtliga läckagepunkter i tunnelbanan för att fastställa geologiska parametrar och bergkvalitet. Karteringsmöjligheten var av varierande grad då tunnarna i många fall är förstärkta med sprutbetong i tunneltak och halvvägs ner på väggarna. De fria bergytter som finns är generellt väldigt smutsiga. RQD, RMR och Q-värden fastställdes som analytiska parametrar för att använda vid senare analys. Strukturgeologiska mätningar plottades i stereonet för att få en uppfattning om generella spricktrender. Motsvarande karteringar gjordes även på några utvalda hållar och bergskärningar i marknivå för jämförelse med karteringar i tunnelbanan. För positioner, se figur 2.

2.6 Statistisk utvärdering

För numerisk utvärdering användes följande metoder för att undersöka korrelation mellan variabler samt för att räkna ut värden som bestäms av en definierad ekvation.

2.6.1 Regressionsanalys

För att förklara kopplingen mellan olika variabler användes en regressionsanalys som beräknades i statistikprogrammet JMP. I regressionsanalysen söks en linje som kan förklara spridningen på en datamängd. Linjen definieras av en linjär eller polynom ekvation. För att finna bästa möjliga linje används minsta kvadratmetoden. I denna beräknas vardera datapunkts avstånd till linjen som sedan tas i kvadrat. Ett medelvärde

av avstånden avgör om den prövade linjen passar bättre än en annan linje. Ekvationen som förklarar linjen med minsta medelkvadratavstånd används (Weiss, 2012).

Determinationskoefficienten R^2 räknas ut som förklarar hur väl korrelationen mellan de två variablerna är. R^2 -värdet kan variera mellan 0 och 1, där 0 innebär ingen korrelation och 1 innebär bästa möjliga korrelation. R^2 -värdet räknas ut genom följande ekvation (Weiss, 2012):

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (8)$$

där **SSR** är summan av avståndet mellan regressionslinjen och medelvärdet av de observerade värdena av responsvariabeln.

SST är summan av avståndet mellan datapunkterna och medelvärdet av de observerade värdena av responsvariabeln.

2.6.2 RMSE

Root mean square error (RMSE) är likt determinationskoefficienten ett värde som förklarar hur väl datamängdens passning kring en linje som definieras av en ekvation är. Ett högre RMSE indikerar längre avstånd för de observerade värdena från linjen. RMSE räknas ut med följande ekvation (Weiss, 2012):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (9)$$

Där e_i är avståndet mellan det observerade värdet och linjen.
 n är antalet observationer.

2.6.3 Minimivärde för ett andragradspolynom

För beräkning av X-värde för minimum i ett andragradspolynom användes PQ-formeln. Ekvationen används för att hitta X-värdena där linjen skär X-axeln. Utifrån dessa två X-värden kan man hitta X för minimipunkten som är i centrum mellan dessa två värden. Formen för en andragradsekvation där y sätts till noll är:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (10)$$

X_1 respektive X_2 beräknas med PQ-formeln enligt följande:

$$p = \frac{b}{a}$$
$$q = \frac{c}{a}$$
$$X = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q} \quad (11)$$

3 Resultat

3.1 Droppkartering

Droppkarteringen sträcker sig från 21/10-14 till 4/12-15. I figur 3 visas summerad droppmängd för samtliga 19 läckage tillsammans med dygnsnederbörd, veckonederbörd och dygnsmedeltemperatur. Även grundvattennivåer från Frescati visas. Mörkare skuggat område visar perioden mellan 9/11-15 och 20/11-15 då injekteringen utfördes.

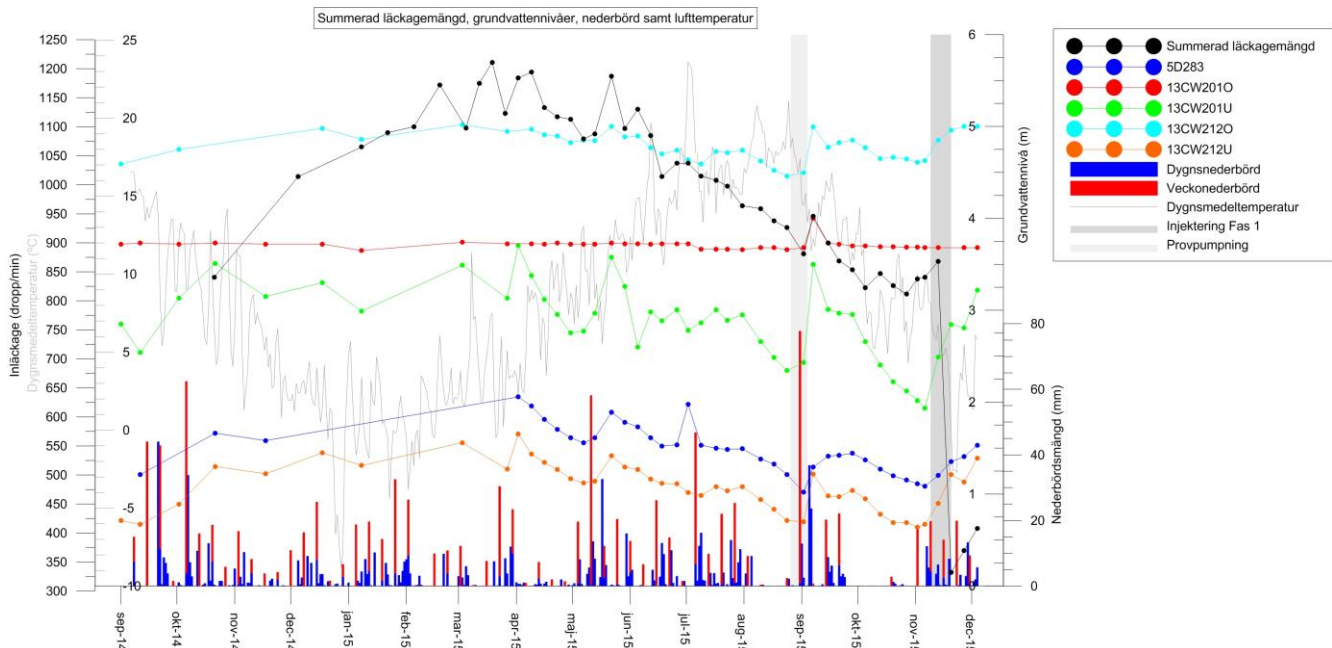
Högsta summerade läckagemängd observerades i mars 2015 med totalt 1211 droppar/min. Innan och efter denna period visas avtagande trender mot hösten 2014 och sommaren 2015. Lägsta droppmängder finner man i början och slutet av mätserien. Lägsta värdet är droppkarterat 27/10-15, alltså cirka två veckor innan injekteringen utfördes och låg på 812 droppar/min. Nederbördsmängden i perioden innan var låg med total månadsnederbörd i oktober på endast 2,8 mm (se tabell 3). I november var totalvärdet högre med 64,5 mm.

Tabell 3. Total nederbörd för respektive månad från september 2014 till november 2015.

| Månad | Månadsnederbörd |
|-----------|-----------------|
| September | 82,9 |
| Oktober | 87,4 |
| November | 31,6 |
| December | 49 |
| Januari | 67,8 |
| Februari | 39 |
| Mars | 60,3 |
| April | 11,9 |
| Maj | 106,9 |
| Juni | 58,5 |
| Juli | 91,9 |
| Augusti | 16,6 |
| September | 112,4 |
| Oktober | 2,8 |
| November | 64,5 |

Droppmängden varierar både på årstidsbasis och under kortare perioder då det kommit stora mängder nederbörd. Exempelvis var den totala veckonederbörden i maj 2015 relativt hög vilket genererade ökade droppmängder. Dessa hastiga ökningarna i nederbörd verkar generellt resultera i proportionella ökningarna i droppmängd som sedan återgår efter en kortare period om inte nederbördsmängden är ihållande. Perioder med relativt hög nederbörd, som hösten 2014 samt november 2015, innan injekteringen, sammanfaller med jämna stabilare förändringar i droppmängd.

Variationer i temperatur visar motsatt trend mot droppmängd. När temperaturen går ner under hösten 2014 går droppmängden upp. Temperaturen vänder mot en positiv trend vid årsskiftet vilket sammanfaller med en minskning i droppmängd, med en viss fördröjning.



Figur 3. Översikt av den summerade läckagemängden för samtliga 19 punktläckage, grundvattennivåer i Frescati samt meteorologiska parametrar för motsvarande period.

3.2 Förändring i läckagemängd och grundvattennivåer

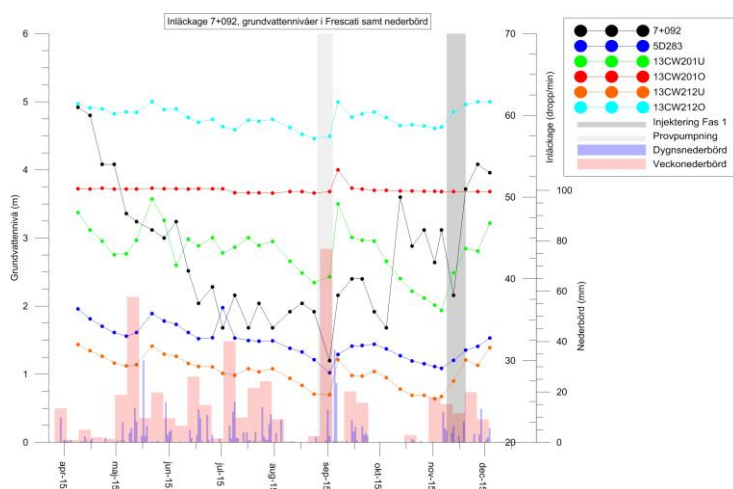
Grundvattennivåer visas tillsammans med den summerade läckagemängden i figur 3 ovan. Datat sträcker sig från augusti 2014 till december 2015, två veckor efter injekteringen. De två rör som slutar på U samt 5D283 är satta i undre grundvattenmagasin medan de två rör som slutar på O är satta i övre grundvattenmagasin. Se figur 2 för grundvattenrörens positioner. Skuggade perioder visar när injekteringen ägde rum, samt när en propumpning pågick i samma område. Under perioden för propumpningen kan man se en avsänkning i grundvattennivåerna för de undre magasinet medan det övre magasinets nivåer är opåverkade. Samtidigt som propumpningen samt precis efter den avslutats kom en relativt stor mängd nederbörd jämfört med månaden innan. Detta sammanfaller med en hastig ökning av nivåerna, speciellt synligt för de övre magasinerna.

Nivåerna för de övre magasinerna visar en jämnare trend över längre tid än vad de undre magasinerna gör. Speciellt nivåerna mätta i rör 13CW201O som endast fluktuerat i januari där man kan se en kraftig sänkning i medeltemperatur (figur 3) samt precis efter propumpningen där man kan se högsta veckonederbörden för hela mätperioden. Dock kan man urskilja samtida förändringar mellan undre och övre magasin om man jämför nivåerna för 13CW212O med nivåerna för 5D283, 13CW212U och 13CW201U.

Om man jämför grundvattennivåerna med den summerade droppmängden i figur 3 samvarierar läckagemängden med samtliga grundvattenrör förutom 13CW201O som inte visar någon samvariation förutom precis efter propumpningen.

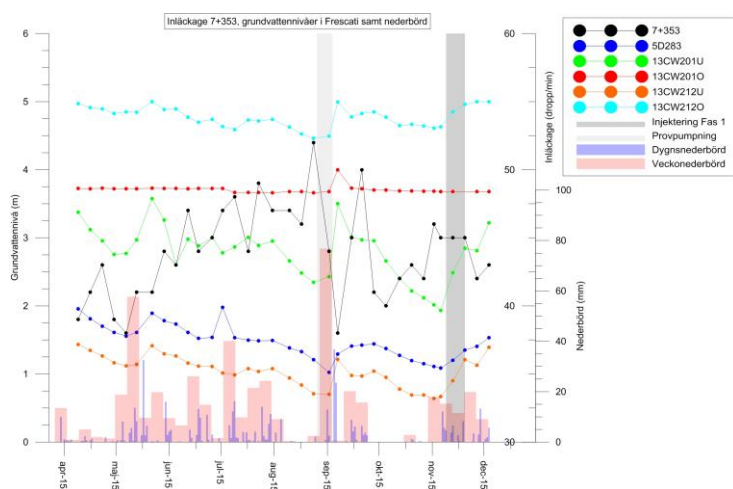
Figur 4 till 16 visar läckagemängd för samtliga läckage i Frescatiområdet samt övriga injekterade läckage, med en veckas intervall sedan början av april 2014. Om ett grundvattenrör visar god samvariation med något av läckagen kan detta användas för att skilja ut naturlig variation mot variationer som beror på själva injekteringen.

Figur 4 visar läckage 7+092. Läckagemängden var mellan april och december mellan cirka 60 och 30 dropp per minut. Lägsta nivån nåddes i början på september och var högre under våren samt under hösten innan injekteringen utfördes. Läckagemängden sjönk under hela våren fram till mitten på juni när den planade ut och höll sig relativt jämn fram till september när en större mängd nederbörd kom. Samvariation med grundvattennivåerna är svårtolkad förutom den relativt jämna perioden mellan juni och september samt vid provpumpningen i månadsskiftet september-augusti då läckagemängden sjönk. Augusti månad hade begränsat med nederbörd fram till början på september då största veckonederbörden för året kom. Under hösten gick nivåerna upp med inblandade oscillationer samfallande med minskad nederbörd i slutet på september och hela oktober efterföljt av mer regn i oktober.



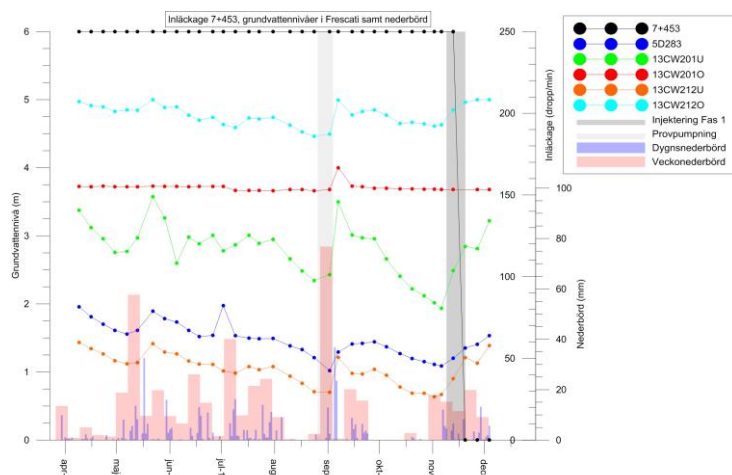
Figur 4. Inläckage 7+092, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckage 7+353 (figur 5) har visat omvänd trend mot 7+092 genom att öka i läckagemängd mot sommaren och gå i avtagande trend mot hösten. Även detta läckage visar eventuell påverkan från provpumpningen. Läckagemängden visar sig oscillera upp och ner från vecka till vecka men med en långsiktig trend som är omvänt proportionell med grundvattennivåerna i rör 5D283, 13CW212U och 13CW212O.



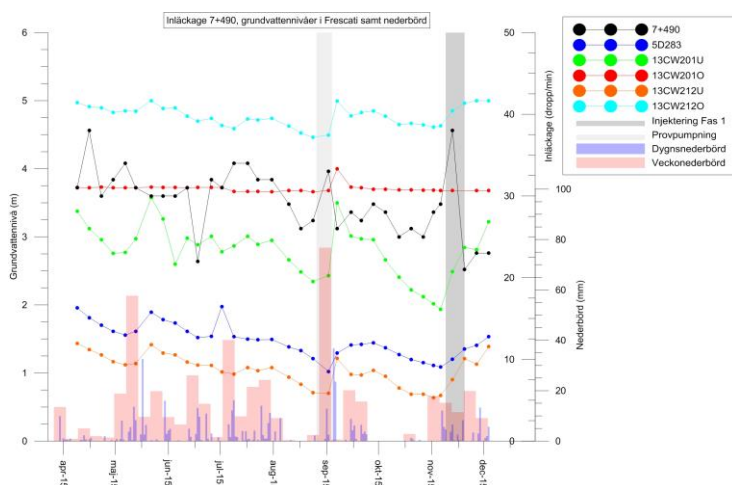
Figur 5. Inläckage 7+353, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckage 7+453 visar en antagen läckagemängd på 250 droppar per minut för hela perioden (se figur 6) eftersom läckaget varit av rinnande mängd och exakt antal dropp därför inte kunnat identifieras. Detta innebär att jämförelse med grundvattennivåer ej är möjlig. Under injekteringsperioden syns en hastig sänkning då läckaget sjönk från rinnande till fukt i sin ursprungliga läckagepunkt. Eftersom läckaget injekterades under andra veckan av genomförandet (se tabell 2) ses läckagemängden som oförändrad halvvägs in i injekteringen.



Figur 6. Inläckage 7+453, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

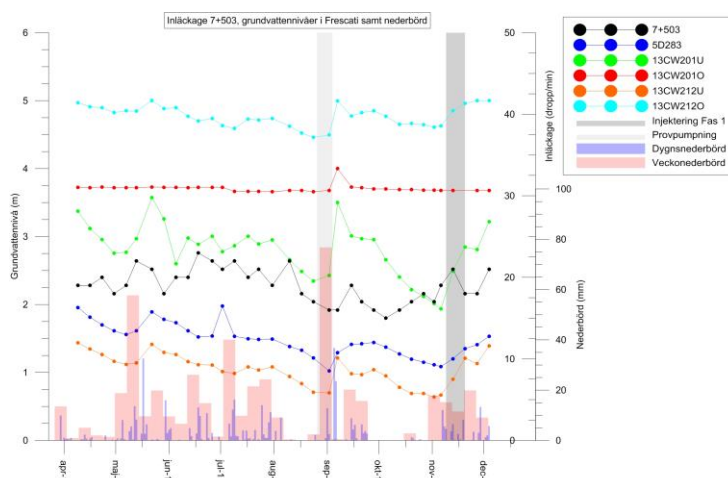
Läckage 7+490 (figur 7) visar relativt jämna nivåer under studieperioden förutom några enstaka hastiga avvikelser i mitten på juni och i början på september. En hastig ökning kan också ses en vecka in i injekteringen. Läckage 7+490 borrades och vattenförlustmättes första veckan och injekterades andra veckan. Efter injekteringen observerades de hittills lägsta droppnivåerna, som indikerar en jämn fortsatt trend.



Figur 7. Inläckage 7+490, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

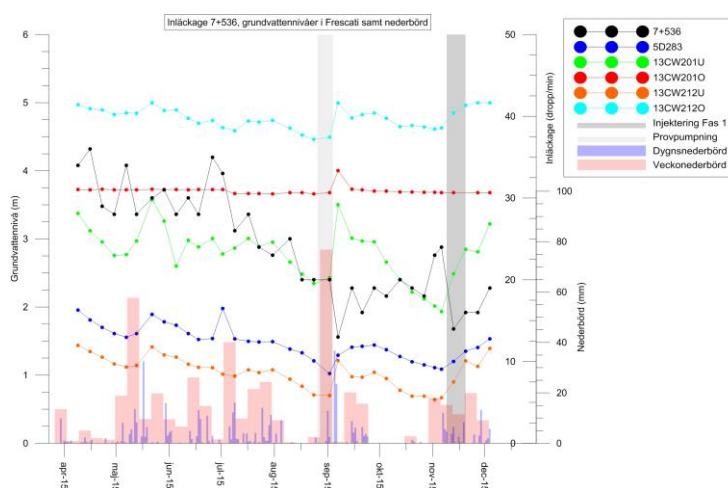
Läckage 7+503 (figur 8) har varierat mellan cirka 25 och 35 dropp per minut utan större toppar eller dalar. Samvariationen med grundvattenröret för de undre magasinen är relativt god, framförallt mellan juni och september. Läckaget visar ingen tydlig reaktion vid perioden för provpumpningen men en respons vid relativt stora mängder nederbörd kan urskiljas. I samband med injekteringsperioden kan man se en ökning av

läckagemängden som sammanfaller med den nederbörd som kom i november efter låg nederbördsmängd under oktober och delar av september.



Figur 8. Inläckage 7+503, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

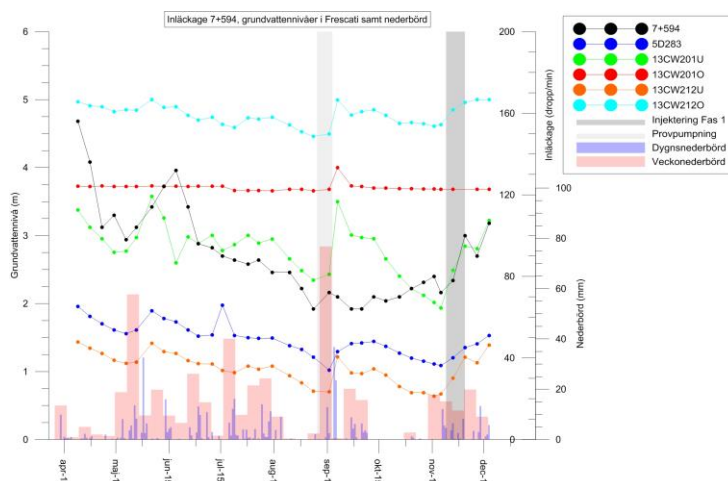
Läckage 7+536 visar relativt god samvariation med grundvattenrör 5D283 och 13CW212U men speciellt med 13CW201U. Avvikelse från detta kan ses under oktober månad då nederbördsmängden är låg men läckaget ändå har en positiv trend. En snabb ökning kan ses precis innan injekteringen samtida med ökade nederbördsmängder. En minskning av läckagemängden kan ses efter en vecka in i injekteringen. Läckagepunkten borrades och vattenförlustmättes men injekterades inte p.g.a. påträffade av drän. Vid vattenförlustmätningen tolkades borrhålen att inte vara i kontakt med läckagepunkten p.g.a. oförändrad omedelbar droppmängd. Läckaget visar koppling till förändringen av grundvattennivåer i samband med provpumpningen i augusti-september samt efterföljande ökning vid den större mängd nederbörd som kom i samband med detta eller kort efter.



Figur 9. Inläckage 7+536, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckage 7+594 visar god samvariation med rör 5D283, 13CW212U, 13CW201U samt delvis 12CW212O för större delar av perioden. Undantag är precis efter provpumpningen där läckaget går ner när grundvattennivåerna stiger. Läckaget håller periodvis en jämnt ökande eller sjunkande trend med vissa kraftigare oscillationer t.ex.

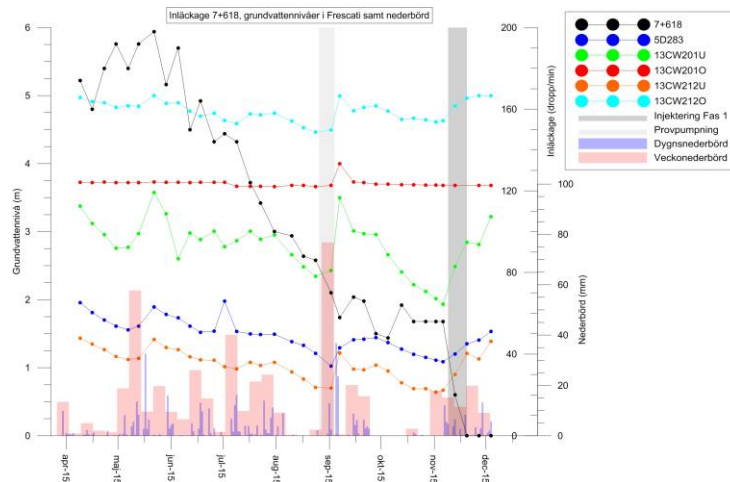
i början i juni då läckaget visar en ökad mängd i ungefär en månads tid. Detta sammanfaller med en ökad nederbörds mängd vid tiden för början av ökningen. Samma kraftiga signal går att se för grundvattennivåerna men är inte lika tydlig för de övriga. Avvikelse från grundvattennivåerna går att se under oktober månad då dessa är avtagande medan läckaget visar motsatt trend. Läckaget visar eventuellt respons på septembernederbörden men med långsammare feedback än grundvattennivåerna. Förändringen som kan ses under injekteringsperioden kan inte bero på borring, vattenförlustmätning eller injektering då inget av detta utfördes. Läckagepunkten dömdes bort för åtgärd efter att ha identifierats som läckande drän.



Figur 10. Inläckage 7+594, grundvattennivåer i Frescati samt nederbörds mängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckage 7+618 (figur 11) är det sista av ovan beskrivna som tillhör Frescatiområdet. Läckaget visar en avtagande trend sedan början av den presenterade perioden. Det går att tyda en avtagande trend hos några av grundvattennivåerna också men de är inte av motsvarande magnitud. Vid perioden för provpumpningen visade läckaget en redan avtagande trend innan, vilken fortsatte efter injekteringen. Innan injekteringen syns en oförändrad trend under fyra veckor. Läckagepunkten borrades och vattenförlustmättes under första veckan av injekteringsperioden och injekterades under andra veckan. Läckagemängden sjönk kraftigt redan efter första veckan för att sedan sjunka ännu mer efter andra veckan. Efter utförandeperioden förändrades läckagepunkten till fukt.

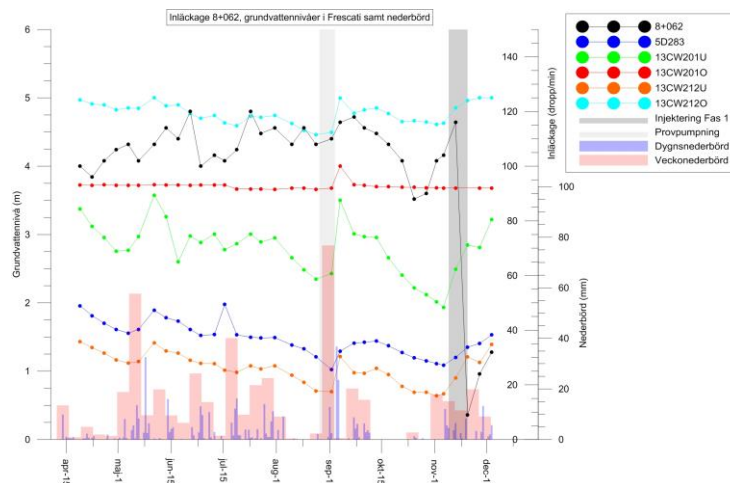
Nedan följande läckage befinner sig utanför Frescatiområdet och borde därför inte ha direkt koppling till grundvattennivåerna. Dock kan en potentiell samvariation vara användbar vid utvärderingen.



Figur 11. Inläckage 7+618, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

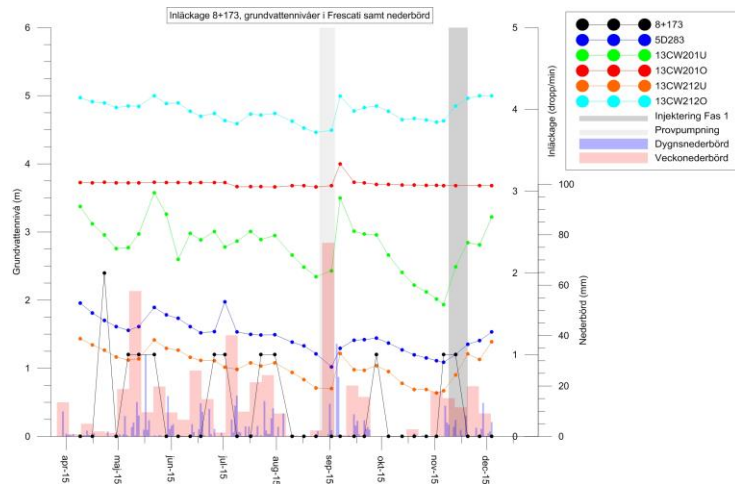
Läckage 8+062 (figur 12) har legat mellan cirka 80 till 120 dropp per minut för perioden med lägstanivåer observerade under oktober månad. Innan injekteringen syns en ökning som sammanfaller med nederbörden i november. Läckaget borrades och injekterades under andra veckan av åtgärdsperioden och visar därför sin naturliga ökning för första veckan. Efter injekteringen kan man se en kraftig sänkning av läckagemängden från den ursprungliga läckagepunkten som sedan fortsätter att öka i samma takt som innan injekteringen.

I jämförelse med grundvattennivåerna ses tydligast samvariation med 13CW201U. Även de övriga visar korrelation förutom 13CW201O, men inte med samma tydlighet.



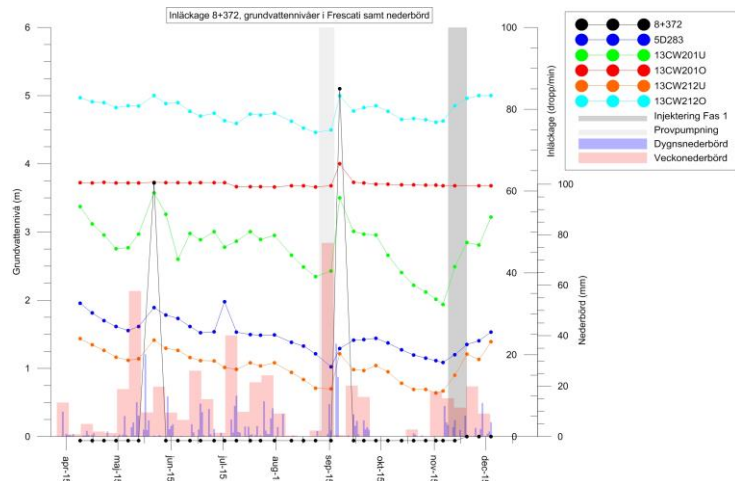
Figur 12. Inläckage 8+062, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckage 8+173 (figur 13) har för det mesta varierat mellan fukt och ett dropp per minut under perioden. Ökning från fukt till dropp verkar inte sammanfalla med några tydliga skillnader i nederbörd eller grundvattennivåer. Generellt går läckagemängden upp till ett dropp per minut under två till tre veckor för att sedan gå tillbaka ned igen. Samma typ av läckagemönster kan ses vid injekteringsperioden där läckaget går upp till ett dropp per minut veckan innan och går ner till andra veckan. Borring, vattenförlustmätning och injektering skedde under andra veckan (se tabell 2).



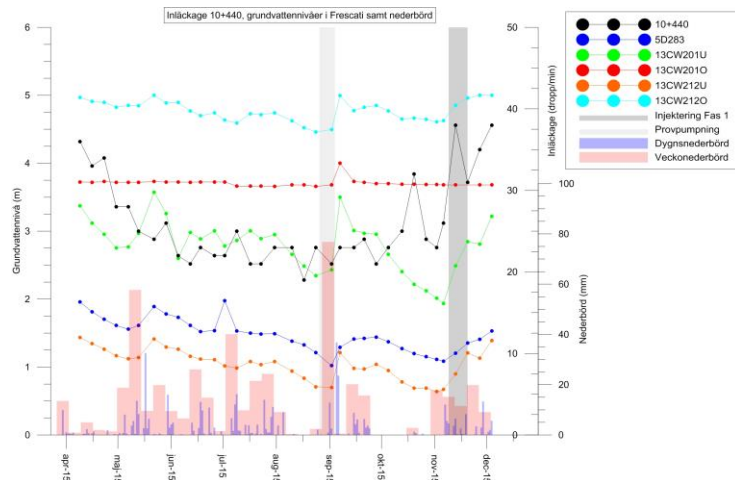
Figur 13. Inläckage 8+173, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckaget vid 8+372 (figur 14) har endast visat sig aktivt under perioden med mycket nederbörd. Under hela perioden kan man se att det krävs cirka 30 mm nederbörd eller mer under en kortare period för att läckaget ska bli aktivt. Eventuellt går det att jämföra med en grundvattennivå över 3,5 meter för 13CW201U. Från perioden april till december var läckaget aktivt två gånger med en maximal droppmängd på 85 dropp per minut. I samband med injektering var nederbördsmängden inte tillräckligt hög för att aktivera läckaget. Den vattenförande sprickan injekterades och tättningsgraden utvärderas vid senare tillfälle då vattenföringen är större. Innan injekteringen var droppunkten torr vilket representeras av ett värde på minus ett. Efter injekteringen uppstod fukt vid läckaget vilket representeras av en nolla.



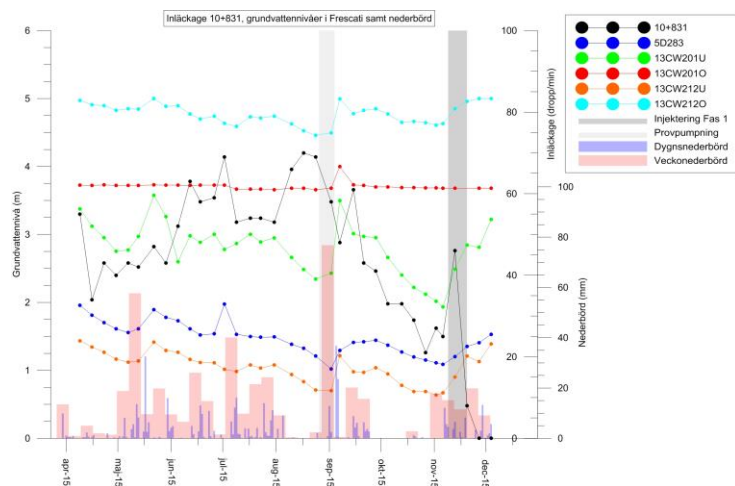
Figur 14. Inläckage 8+372, grundvattennivåer i Frescati samt nederbördsmängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckage 10+440 (figur 15) visar lägre läckagemängd under sommarmånaderna och högre mängder under vår och höst. Ingen tydlig korrelation med grundvattenrören i Frescati syns. Kopplingen mot nederbördsvariationer är inte heller särskilt tydlig. Läckaget borrades, vattenförlustmättes samt injekterades under första veckan av injekteringsperioden. Läckaget ökade efter första veckan och gick sedan ned igen andra veckan. Läckagetrenden före och efter injekteringen ser ut att följa en naturlig förändring med tillfällig yttre påverkan under injekteringen.



Figur 15. Inläckage 10+440, grundvattennivåer i Frescati samt nederbörds mängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

Läckage 10+831 (figur 16) har varierat relativt mycket under perioden med en högsta läckagemängd i mitten på augusti. Kopplingen med nederbörden är tvetydig då man kan se en tydlig ökning under augusti då nederbörden är låg och en minskning under oktober då nederbörden också är låg. Kopplingen till grundvattennivåerna är svårtolkad men verkar stämma mest överens med rör 13CW201U med undantag för förändringen under augusti. Före och under injekteringsperioden kan man se en ökning i läckagemängd samt grundvattennivå. Läckagemängden sjunker hastigt andra veckan då borring, vattenförlustmätning och injekteringen utfördes. Efter avslutad injekteringsperiod sjönk läckagemängd ytterligare till fukt på tidigare droppunkt.



Figur 16. Inläckage 10+831, grundvattennivåer i Frescati samt nederbörds mängd från april till två veckor efter injekteringsperioden.

3.3 Transmissivitet och hydraulisk apertur

Vattenförlustmätningen resulterade i vattenförluster över en viss tid som räknades om till transmissivitet och hydraulisk apertur med ekvation 6 respektive 7. Beräknade värden i tabell 4 avser injekterade hål (se figur 18 till 28 med ritningar över vardera läckage nedan) som vid vattenförlustmätningen varit i kontakt med läckagepunkt, med undantag för 7+536 och 7+797 (som inte injekterades) och 8+173 (som i efterhand tolkades som i kontakt med läckaget då fukten förflyttade sig från ursprunglig läckagepunkt till borrhålet efter vattenförlustmätning var utförd).

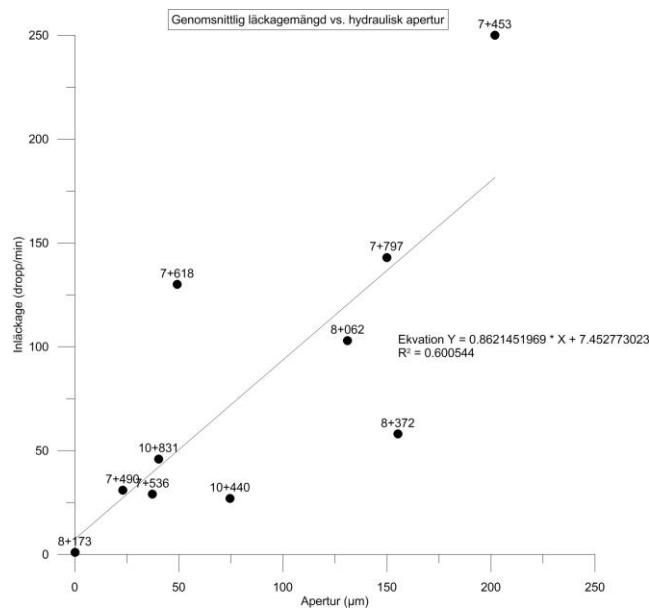
Eftersom apertur beräknats utifrån respektive transmissivitet är de direkt beroende av varandra. Då apertur beräknats från korta borrhål som varit i kontakt med läckagepunkten görs antagandet att aperturen representerar den vattenförande sprickan för den studerade läckagepunkten och inte bergmassan i sin helhet. Troligt är dock att spricksystemet är mer komplicerat än så och att vattenförlustmätningen i vissa fall har ett influensområde som sträcker sig bortom den lokala sprickan (Gustafsson, 2009).

Tabell 4. Beräknad transmissivitet och hydraulisk apertur för respektive vattenförlustmätt läckagepunkt.

| Kilometertal | Transmissivitet (m ² /s) | Apertur (µm) |
|--------------|-------------------------------------|--------------|
| 7+453 | 5,9E-06 | 202 |
| 7+490 | 8,7E-09 | 23 |
| 7+536 | 3,7E-08 | 37 |
| 7+618 | 8,5E-08 | 49 |
| 7+797 | 2,4E-06 | 150 |
| 8+062 | 1,6E-06 | 131 |
| 8+173 | 0,0E+00 | 0 |
| 8+372 | 2,7E-06 | 155 |
| 10+440 | 3,0E-07 | 75 |
| 10+831 | 4,6E-08 | 40 |

I figur 17 jämförs den genomsnittliga droppmängden innan injekteringen med beräknad hydraulisk apertur för varje läckagepunkt där vattenförlustmätning har utförts. R²-värde mellan droppmängden och aperturen blev ~0,6 vilket innebär att korrelationen inte är optimal men heller inte obefintlig (Weiss, 2012). Om man tittar på spridningen av data i figur 17 ser man att 7+453, 7+618 och 8+372 avviker något från gruppen. 8+372 har som beskrivet tidigare (se figur 14) endast haft ett aktivt inläckage vid perioder med mycket nederbörd. Det använda värdet i figur 17 är därför ett medelvärde från de tillfällen som läckaget varit aktivt. Om 7+618 ska passa in på den linjära passningslinjen borde antingen droppmängden vara lägre för den beräknade aperturen eller aperturen högre för den karterade droppmängden. Läckagemängden för 7+453 har under hela studieperioden varit rinnande och därför ej varit möjlig att kartera. Då droppkartering är genomförbart upp till cirka 200 dropp per minut har den rinnande mängden i detta fall kvantifierats som 250 dropp per minut som ett rimligt antagande.

Även korrelationen mellan apertur och injekteringsvolym undersöktes vilket resulterade i ett R²-värde på 0,35 vilket indikerar att det inte finns något samband mellan dem.



Figur 17. Genomsnittlig läckagemängd i förhållande till uträknad apertur från vattenförlustmätningarna.

3.4 Injekteringsutförande och total läckageförändring

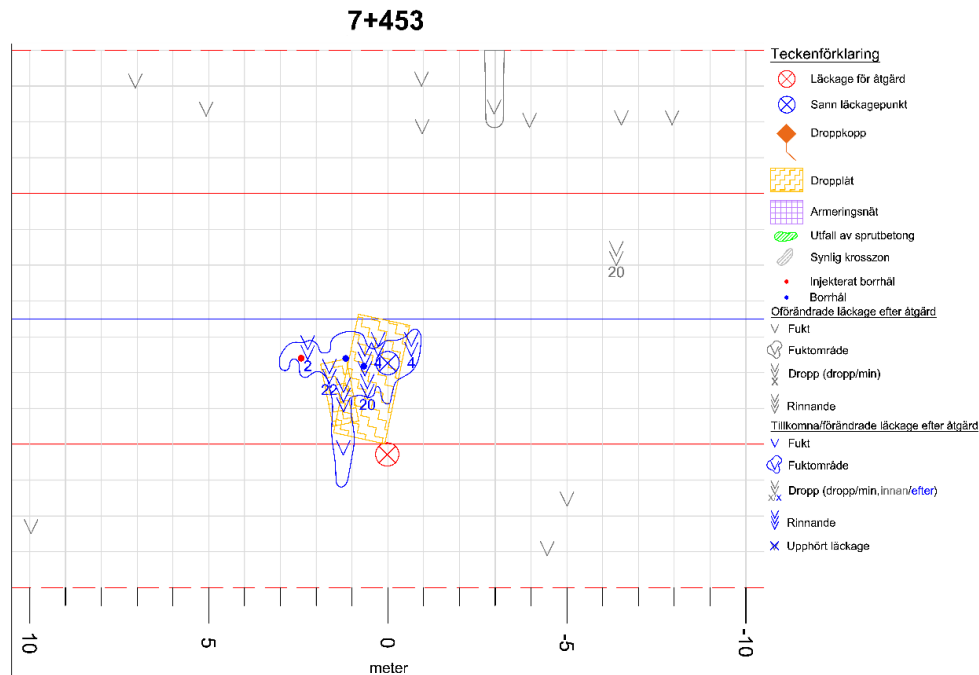
Nedan beskrivs det platsspecifika injekteringsutförandet samt resultatet av injektering avseende total läckageförändring runt det utvalda läckaget för åtgärd. Tunnelritningar med tak och utvikta väggar visar de olika läckagens förhållande till varandra, före samt efter injekteringen tillsammans med lägen för de injekteringshål som borrades under tätningsförsöket.

3.4.1 Läckagepunkt 7+453

Vid 7+453 borrades tre hål för att få kontakt med läckagepunkten (se figur 18). Vid borring av första hålet träffade man på armering i sprutbetongen vilket resulterade i att man fick avbryta hålet efter cirka 20 cm. Ett nytt tre meter långt hål borrades och vattenförlustmättes utan kontakt med läckagepunkten. Det tredje hålet fick god kontakt med drygt 23 liter vattenförlust på två minuter. Hål ett och två pluggades för att ge mothåll vid injekteringen. Injektering utfördes i 34,5 minut tills ytutträngning och uppnått sluttryck nåddes. Total injekterad volym blev 70 liter. 4 % accelerator tillsattes efter tio minuter.

Innan åtgärd var läckaget av rinnande mängde som avleddes via dropplåt ner i makadamen vid sidan av strömskenan. Dropplåten togs ned innan borring vilket visade var den sanna läckagepunkten var. Hela läckagemängden kom från en läckagepunkt i berg/sprutbetongytan. Övriga läckage runt omkring bestod innan av mestadels punkter med fukt samt något dropp. Dessa var efter injekteringen i stort sett oförändrade och den största förändringen kunde ses precis runt injekteringspunkten.

Efter injekteringen uppstod ett stort område med fukt som i sig hade ett flertal läckage i droppande samt rinnande mängd. Vid den ursprungliga läckagepunkten kvarstod endast fukt. Detta resultat kvarstod även två veckor efter injekteringen utfördes.

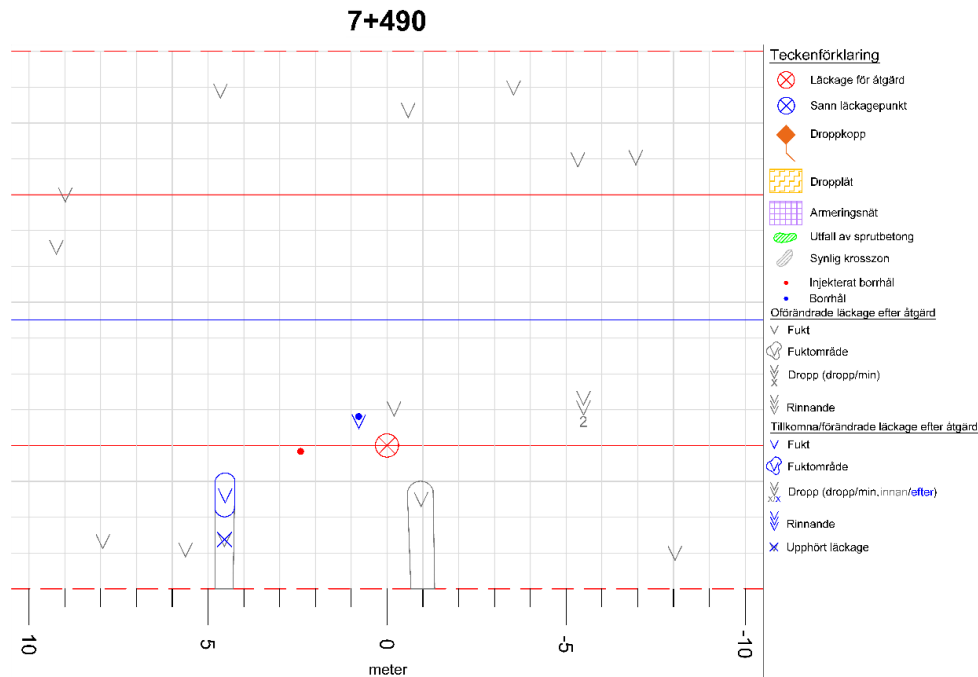


Figur 18. Karterat läckage för åtgärd vid 7+453 samt övriga läckage runt omkring, före och efter utförd injektering. Punkt för åtgärd avser angivet kilometertal.

3.4.2 Läckagepunkt 7+490

Två tre meter långa hål borrades vid 7+490. Första hålet hade vid vattenförlustmätning kontakt med läckaget vilket märktes genom ökad droppmängd ur läckagepunkten. Vattenförlusten var dock relativt liten på cirka 0,5 deciliter på två minuter. Därför valdes att borra ännu ett hål för att söka bättre kontakt och större vattenförlust. Andra hålet var ej i kontakt med läckaget och man valde därför att injektera första hålet. Andra hålet pluggades med engångspacker. Injektering utfördes under två minuter tills sluttryck uppnåddes. Ingen ytutträngning observerades.

Det karterade inläckaget vid 7+490 var totalt relativt litet med mest fuktpunkter och ett dropp förutom läckaget för åtgärd (se figur 19). Efter injekteringen skedde inga större förändringar. Ett fuktområde på ena väggen minskade något samt att fukt uppstod ur det första borrade hålet.



Figur 19. Karterat läckage för åtgärd vid 7+490 samt övriga läckage runt omkring, före och efter utförd injektering. Punkt för åtgärd avser angivet kilometertal.

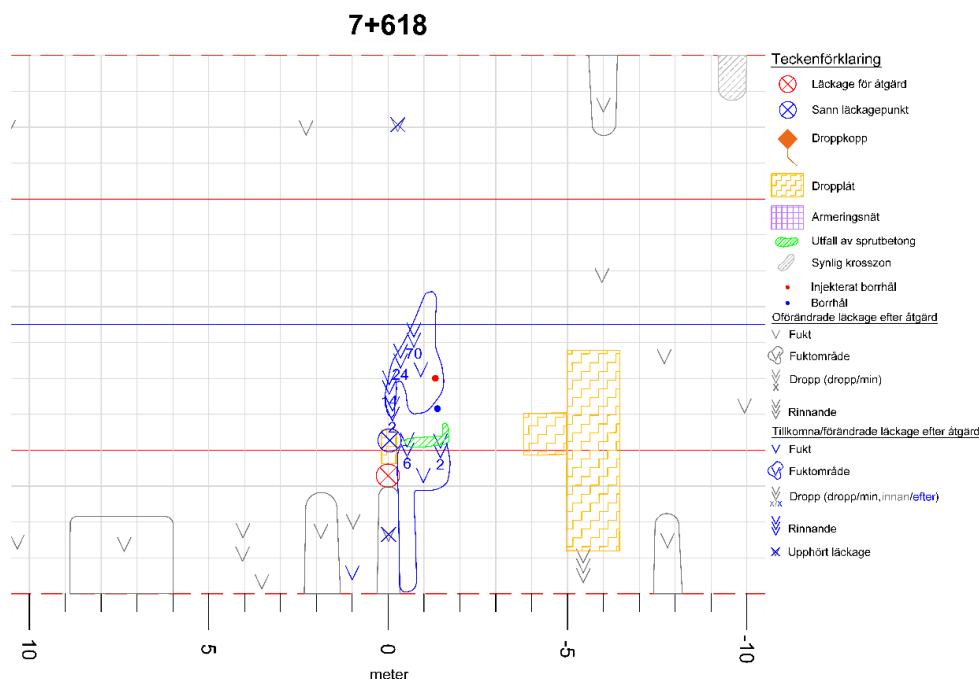
3.4.3 Läckagepunkt 7+618

Vid 7+618 var läckaget ett dropp från en liten dropplåt. Plåten monterades ned innan injekteringsarbetet påbörjades. Ursprunglig respektive sann läckagepunkt visas på figur 21. Två stycken hål borrades. Första hålet gav en vattenförlust på 176 ml men ingen kontakt med läckagepunkten observerades. Därför valdes att borra ett hål till. Hål två visade god kontakt med läckagepunkten och gav en vattenförlust på 442 ml. Hål ett pluggades med lin och polyuretan. Injektering (figur 20) av hål två utfördes i 48 minuter med en injekteringsmedelåtgång på 60 liter. Injekteringen avbröts när ett område av sprutbetong började spricka och falla ut.



Figur 20. Injektering vid läckage 7+618. Injekteringsmanschett med manometer för mätning av injekteringstryck.

Innan injektering utfördes var läckaget av droppande mängd och hade en genomsnittlig droppmängd på 130 dropp per minut. Efter reducerades detta till fukt. I området kring läckagepunkten uppstod ett stort område med fukt med fyra punkter med varierande droppmängd (se figur 21). Även där utfallet skedde uppstod ett område med fukt och dropp. Övriga läckage är oförändrade förutom någon fuktpunkt tillkommit och någon som försvunnit.

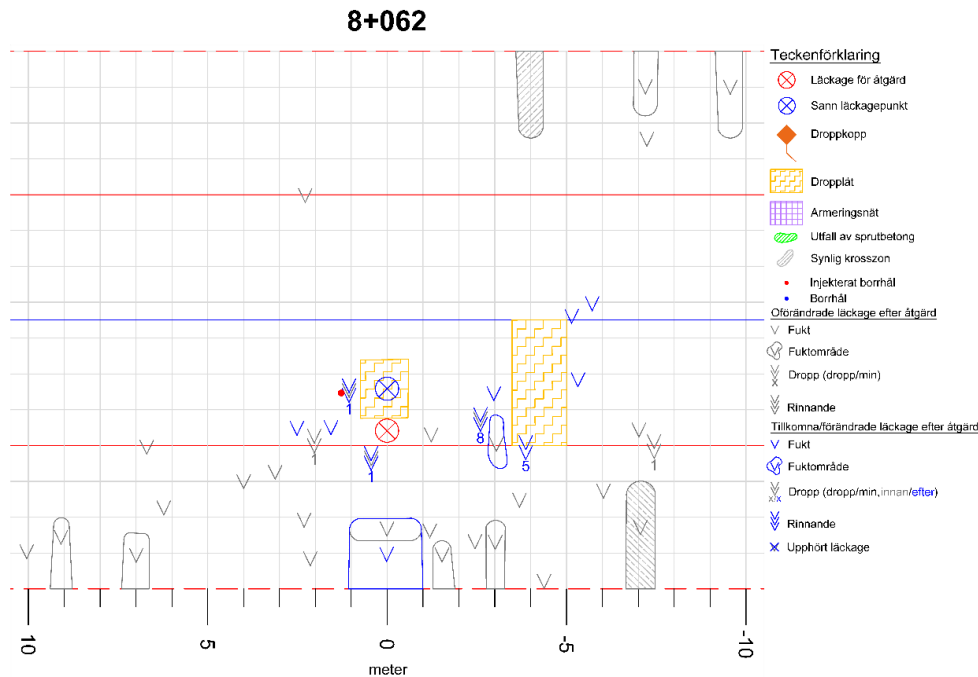


Figur 21. Karterat läckage för åtgärd vid 7+618 samt övriga läckage runt omkring, före och efter utförd injektering. Punkt för åtgärd avser angivet kilometertal.

3.4.4 Läckagepunkt 8+062

Vid 8+062 borrades ett hål, 2,5 meter långt. Kontakten med läckagepunkten var mycket god med en vattenförlust på drygt 6,9 liter på två minuter. Hålet injekterades i 29,5 minuter. Accelerator tillsattes efter 22 minuter. Åtgången på injekteringsmedel blev 45 liter. Injekteringen avslutades när sluttryck nåddes. Ingen ytuträining observerades men bubblande vatten från medlets reaktion syntes i flera punkter ur sprutbetongen.

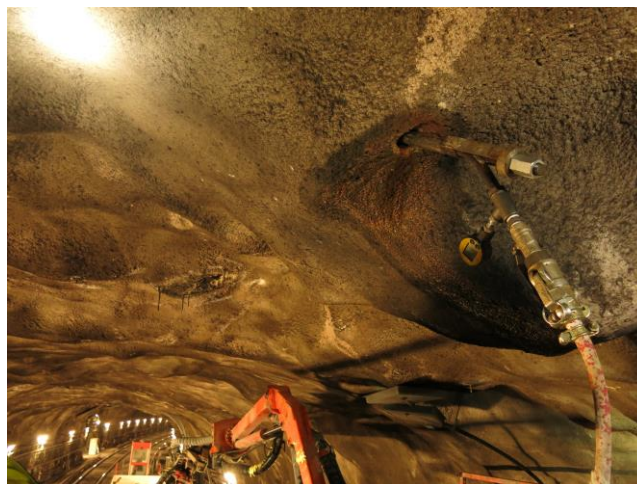
Innan injektering bestod läckaget för åtgärd av ett dropp från dropplåt med en medelläckagemängd på 103 droppar per minut. Dropplåten monterades ned innan borring. Sann läckagepunkt visas på figur 22. Övriga läckage runt omkring bestod av en stor andel fukt och några enstaka dropp. Efter injekteringen uppstod flera fukt- och dropppunkter i södergående riktning. I samma riktning identifierades också synliga svaghetszoner i berget i tunnelns vägg.



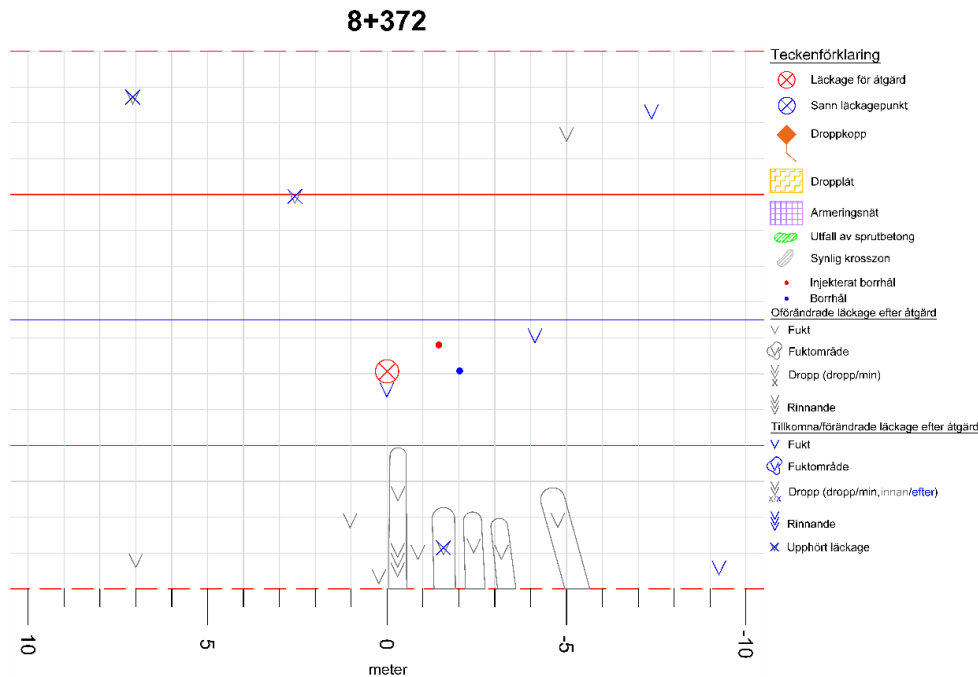
Figur 22. Karterat läckage för åtgärd vid 8+062 samt övriga läckage runt omkring, före och efter utförd injektering. Punkt för åtgärd avser angivet kilometertal.

3.4.5 Läckagepunkt 8+173

Vid läckagepunkt 8+173 borrades två hål som först ansågs att ej vara i kontakt med läckagepunkt enligt vattenförlustmätningar (se figur 23) som ej gav någon förlust. Efter borrning uppstod ett läckage av fukt i ena hålet tillsammans med att den ursprungliga läckagepunkten minskat sin fuktyta. Därmed ansågs det andra i ordningsföljden borrade, 2,7 meter långa hålet vara i kontakt och injekterades. Det först borrade hålet pluggades med engångspacker som lämnades i hålet. Injektering utfördes under två minuter med en åtgång av injekteringsmedel på fyra liter. Injekteringen avslutades när sluttryck uppnåddes. Injekteringsmanschetter höll i slutet inte för trycket utan medel sköts ut i hålets riktning. Ingen yttutträngning ur tunnelkonturen observerades.



Figur 23. Vattenförlustmätning genom enkelmanschett vid läckage 8+173. Manometer (gul) monterad på manschett för mätning av grundvattenstryck.



Figur 25. Karterat läckage för åtgärd vid 8+372 samt övriga läckage runt omkring, före och efter utförd injektering. Punkt för åtgärd avser angivet kilometertal.

3.4.7 Läckagepunkt 10+440

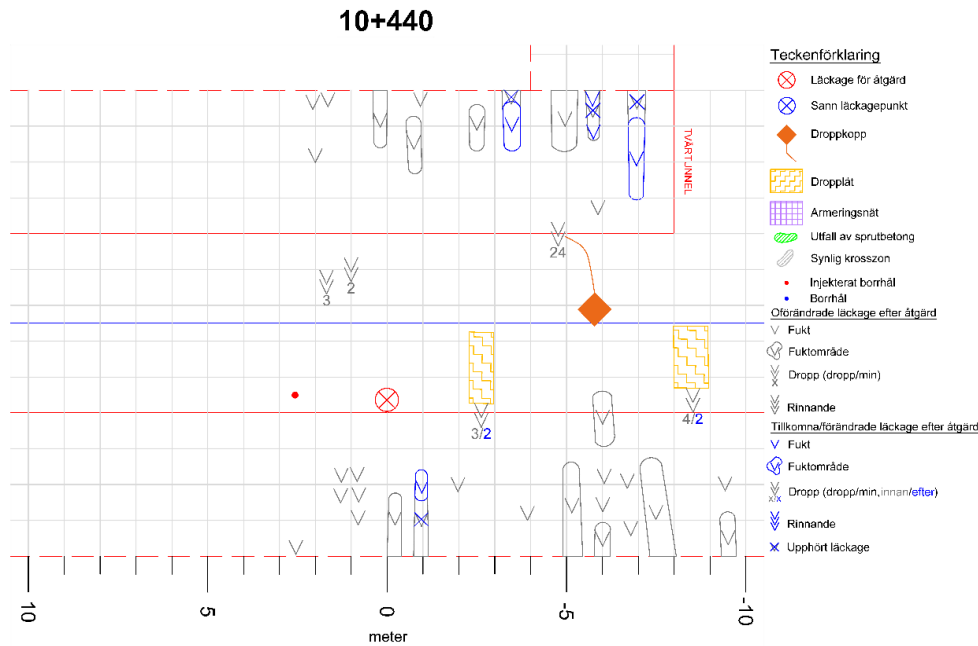
Vid läckage 10+440 borrades (se figur 26) ett hål, 2,5 meter långt. Hålet visade kontakt med läckagepunkt och hade en vattenförlust på cirka 1,4 liter för två minuter. Injektering pågick i tre minuter med en åtgång på nio liter av injekteringsmedel. Injektering avslutades när sluttryck uppnåts. Ingen ytutträngning observerades.



Figur 26. Borrhning av injekteringshål vid läckage 10+440.

Innan injekteringen hade läckaget haft en medelläckagemängd på 27 droppar per minut. Läckagemängden ökade något efter utförd injektering.

Runt punktläckaget påträffades flertal läckage av fukt och dropp, främst i södergående riktning. Efter injekteringen hade några av fuktpartierna minskat till ytan samt att några av droppen minskat något (se figur 27).



Figur 27. Karterat läckage för åtgärd vid 10+440 samt övriga läckage runt omkring, före och efter utförd injektering. Punkt för åtgärd avser angivet kilometertal.

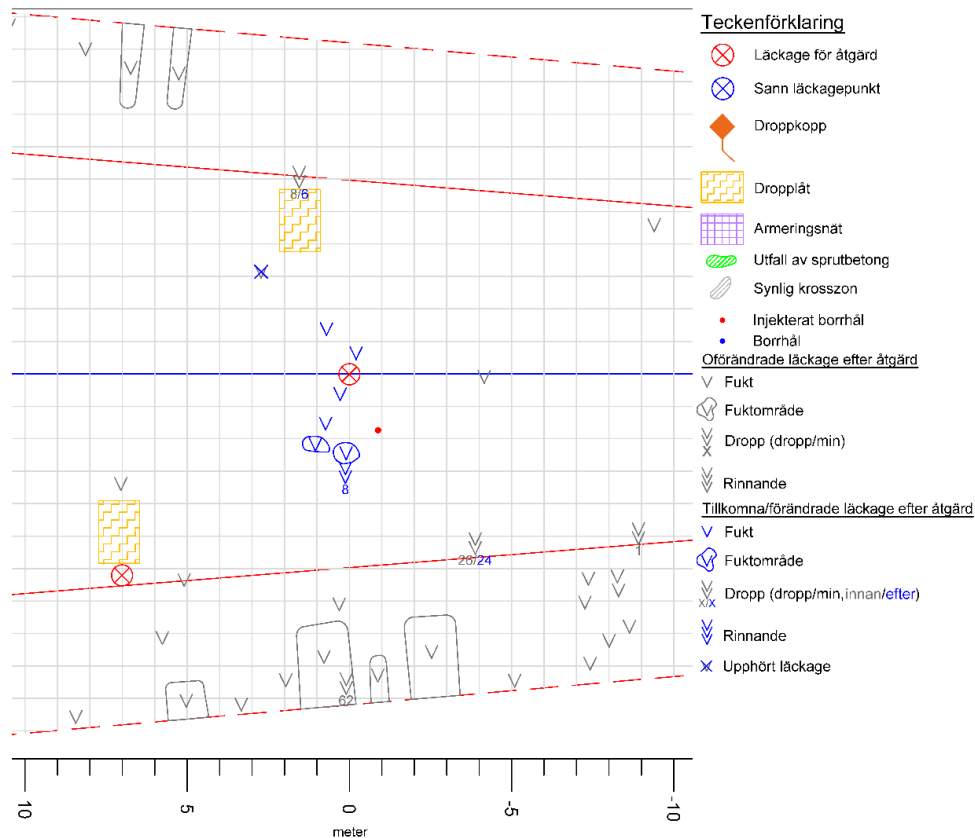
3.4.8 Läckagepunkt 10+831

Vid 10+831 var den aktiva läckagepunkten ur synlig bergyta. Innan injekteringen hade läckaget en medelläckagemängd på 46 droppar per minut. Läckaget låg i närhet till läckage 10+838 som också valts ut för åtgärd men inte hanns med under denna utförandeperiod.

Ett hål borrades hade god kontakt med läckagepunkten även om vattenförlusten inte var så stor med cirka 2,5 deciliter för två minuter. Injektering utfördes under 29,45 minuter med en åtgång på 44 liter injekteringsmedel. Accelerator tillsattes efter 23,5 minut. Yttutträngningen var god och spred sig till ytliga sprickor cirka två meter kring läckagepunkten. Spridningen av injekteringsmedel verkar ha koncentrerat sig till ett sprickplan ovanför ett stort bergblock som var bultat i tunneltaket. Injekteringen avslutades när sluttryck uppnåts.

Efter injekteringen utförts minskade läckagepunkten till fuktmängd men flera nya fuktpunkter uppstod samt en ny dropppunkt (se figur 28). Övriga tidigare läckage vid platsen förändrades inte förutom två dropppunkter som minskade något.

10+831



Figur 28. Karterat läckage för åtgärd vid 10+831 samt övriga läckage runt omkring, före och efter utförd injektering. Punkt för åtgärd avser angivet kilometertal.

Grundvattentryck mättes vid fem av de åtta injekterade läckagepunkterna samt vid 7+797 där det inte injekterades men vattenförlustmätning utfördes. Grundvattentrycket varierade mellan 0 och 110 kPa. Där grundvattentryck inte mättes antogs ett tryck på 50 kPa för utförda beräkningar.

3.4.9 Förändring i läckagemängd

I tabell 5 presenteras resultatet av injekteringen i förändrad droppmängd. Förändringen visas som både absolut förändrad droppmängd och procentuellt förändrad droppmängd. Samtliga jämförelser har droppmängden precis före injekteringen som referensvärde. Eftersom injekteringen skedde olika dagar under utförandeperioden har droppmängden för olika datum valts för att representera samma relativa tidsskillnad. Förändring 1 avser förändring i droppmängd 1-2 dagar efter injekteringen utfördes, förändring 2 avser en vecka efter och förändring 3 avser två veckor efter. Förändring ”totalt” avser total förändrad droppmängd för tunnelsektionen tio meter åt vardera håll från det studerade punktläckaget (se figur 18 till 28). Den totala mängden före och efter karterades i slutet på vecka 45, veckan innan injekteringen påbörjades respektive i början på vecka 48, efter injekteringen.

Tabell 5. Förändring vid olika tidpunkter, i absolut och procentuell droppmängd efter utförd injektering. Skuggade rutor representerar en negativ förändring i droppmängd.

| Kilometertal | Förändring 1 (d/m) | Förändring 2 (d/m) | Förändring 3 (d/m) | Förändring totalt (d/m) | Förändring 1 (%) | Förändring 2 (%) | Förändring 3 (%) | Förändring totalt (%) |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 7+453 | -250 | -250 | -250 | 304 | -100 % | -100 % | -100 % | 122 % |
| 7+490 | 11 | -10 | -8 | -7 | 35 % | -32 % | -26 % | -24 % |
| 7+618 | -47 | -46 | -46 | 73 | -102 % | -100 % | -100 % | 130 % |
| 8+062 | -115 | -100 | -124 | -90 | -93 % | -81 % | -74 % | -78 % |
| 8+173 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 % | 0 % | 0 % | 1500 % |
| 8+372 | 0 | > | > | > | 0 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| 10+440 | 8 | 1 | 5 | 0 | 27 % | 3 % | 17 % | 0 % |
| 10+831 | -8 | -16 | -16 | -6 | -50 % | -100 % | -100 % | -13 % |

Förändring 1, 2, och 3 avser alltså endast den dropppunkt som pekades ut för åtgärd och tar inte hänsyn till eventuell förflyttning av läckaget, vilket förändring ”totalt” gör. I de fall som dropppunkten varit helt torr eller fuktig har detta kvantifierats genom att fuktig satts som noll och torr som minus 1. Detta för att torrhet ska synas i den numeriska analysen eftersom det innebär att allt flöde till den studerade läckagepunkten har upphört. Av den anledningen visar läckaget vid 7+618 en negativ förändring på -102 %.

Vid förändring 1, alltså 1-2 dagar efter injekteringen kan man se att fyra av de åtta läckagen visar negativ förändring vid läckagepunkten. Av dessa fyra visar två en förbättring på 100 %. De övriga visar ingen förändring eller en ökning. Vid förändring 2 kvarstår samma fyra som negativt förändrade. Då har även droppmängden vid 7+490 gått från positiv till negativ. Dessa fem kvarstår som negativa även vid förändring tre och ligger kvar på likvärdiga läckagemängder som veckan innan. Vid förändring tre har också 10+831 nått en negativ förändring på 100 %.

Vid förändring 1 visar två av de övriga en positiv förändring och två är oförändrade. Förutom för 7+490 som minskar efter förändring 1 kvarstår resultateten i samma riktning fram till förändring 3. Cirka hälften av läckagen visar en positiv förändring under utvärderingsperioden medan den andra hälften visar en negativ förändring.

Den totala förändringen i läckagemängd skiljer sig något från de enskilda läckagepunkterna. 7+490, 8+062 och 10+831 visar en minskning i droppmängd. Övriga visar en ökning förutom 10+440 som är oförändrad totalt. Största positiva förändringen har 7+453 i absolut läckagemängd och 8+173 procentuellt. Största negativa förändringen totalt har 8+062 både i absolut och procentuell mängd.

Förändringen av läckagemängd för de fyra olika utvärderingstillfällena jämfördes med beräknad hydraulisk apertur, bergkvalitetvärden, injekteringsvolym, injekteringstid samt injekteringsflöde (injekteringsvolym/injekteringstid). Eventuell korrelation med någon av de inblandade parametrarna skulle kunna göra det möjligt att förutsäga ett resultat baserat på grundförutsättningar eller utförandemetod. Tabell 6 till 9 visar determinationskoefficienter för respektive jämförelse vid förändring 1, 2, 3 och totalt. Korrelation undersöktes med linjär passning och passning med andragradspolynom.

Förändring i droppmängd vid förändring 1, alltså 1-2 dagar efter injekteringen var i jämförelse med presenterade variabler bäst korrelerade med tidigare genomsnittlig läckagemängd, injekteringsvolym samt apertur. R^2 -värde på 0,88 indikerar en relativt god negativ korrelation med läckagemängden innan injekteringen (tabell 6). Injekteringsvolym och apertur korrelerar med R^2 -värden på 0,58 respektive 0,55 vilket innebär att korrelationen inte är lika god men något typ av samband troligtvis finns. Övriga variabler har R^2 -värden på under 0,3 vilket gör det svårt att säga att någon koppling finns.

Vid passning med linje av andragradspolynom kan man se en liknande korrelationsordning för variablerna med samma ordning hos de fem översta som den linjära passningen, men med en bättre passning för de fyra översta där läckagemängden visar bäst korrelation med ett R^2 -värde på 0,9.

Tabell 6. Determinationskoefficienter för jämförelse mellan förändrad droppmängd efter utförd injektering avseende "förändring 1" samt presenterade variabler. Gråskuggade rutor avser negativ lutning/korrelation på regressionslinjen. Variablerna är placerade i korrelationsordning för linjär modell och modell av andragradspolynom.

| Variabel | R^2 -Linjär modell | Variabel | R^2 - 2:a Polynom |
|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| Läckagemängd | 0,88 | Läckagemängd | 0,90 |
| Injekteringsvolym | 0,58 | Injekteringsvolym | 0,75 |
| Hydraulisk apertur | 0,55 | Hydraulisk apertur | 0,69 |
| Injekteringstid | 0,29 | Injekteringstid | 0,33 |
| Q-kross | 0,20 | Q-kross | 0,20 |
| Q | 0,10 | Injekteringsflöde | 0,18 |
| RQD | 0,08 | Q | 0,16 |
| Injekteringsflöde | 0,05 | RMR | 0,12 |
| RQD-kross | 0,04 | RQD | 0,08 |
| RMR-kross | 0,04 | RMR-kross | 0,07 |
| RMR | 0,02 | RQD-kross | 0,06 |

För förändring 2 (tabell 7) visas liknande korrelationsordning som för förändring 1. Läckagemängd, injekteringsvolym, apertur och injekteringstid har högst R^2 -värden. Injekteringstiden har ingen korrelation då R^2 -värdet endast är 0,25. R^2 -värden för injekteringsvolym och apertur är något lägre vid förändring 2 än förändring 1. R^2 -värden för passning med andragradspolynom är högre för läckagemängd och injekteringsvolym än vid förändring 1. Totalt så visar datapunkterna bättre passning med andragradspolynomet än med den linjära modellen. För både förändring 1 och 2 så visar variablerna avseende bergkvalitet dålig passning.

Tabell 7. Determinationskoefficienter för jämförelse mellan förändrad droppmängd efter utförd injektering avseende "förändring 2" samt presenterade variabler. Gråskuggade rutor avser negativ lutning/korrelation på regressionslinjen. Variablerna är placerade i korrelationsordning för linjär modell och modell av andragradspolynom.

| Variabel | R ² -Linjär modell | Variabel | R ² - 2:a Polynom |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Läckagemängd | 0,88 | Läckagemängd | 0,93 |
| Injekteringsvolym | 0,56 | Injekteringsvolym | 0,76 |
| Hydraulisk apertur | 0,52 | Hydraulisk apertur | 0,69 |
| Injekteringstid | 0,25 | Injekteringstid | 0,29 |
| Q-kross | 0,20 | Q-kross | 0,22 |
| Q | 0,13 | Q | 0,20 |
| RQD | 0,05 | RMR | 0,14 |
| Injekteringsflöde | 0,02 | Injekteringsflöde | 0,14 |
| RQD-kross | 0,02 | RMR-kross | 0,06 |
| RMR-kross | 0,02 | RQD | 0,05 |
| RMR | 0,02 | RQD-kross | 0,05 |

För förändring 3 (tabell 8) kvarstår samma korrelationsordning i toppen med några omkastningar i ordning längre ned där ingen korrelation påvisas. Läckagemängd, injekteringsvolym, apertur och injekteringstid har samma ordning för både linjär passning och passning med andragradspolynom. R²-värdena är något högre för andragradspolynomet. R²-värdena är precis om mellan förändring 1 och 2 något lägre för förändring 3 än för förändring 2. Alla variabler längst ner på listan innefattar bergkvalitet förutom injekteringsflöde som placerat sig något steg längre ned i listan tillsammans med senare utvärderingstidpunkt.

Tabell 8. Determinationskoefficienter för jämförelse mellan förändrad droppmängd efter utförd injektering avseende "förändring 3" samt presenterade variabler. Gråskuggade rutor avser negativ lutning/korrelation på regressionslinjen. Variablerna är placerade i korrelationsordning för linjär modell och modell av andragradspolynom.

| Variabel | R ² -Linjär modell | Variabel | R ² - 2:a Polynom |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Läckagemängd | 0,86 | Läckagemängd | 0,88 |
| Injekteringsvolym | 0,56 | Injekteringsvolym | 0,72 |
| Hydraulisk apertur | 0,53 | Hydraulisk apertur | 0,66 |
| Injekteringstid | 0,26 | Injekteringstid | 0,32 |
| Q-kross | 0,22 | Q-kross | 0,23 |
| Q | 0,11 | Q | 0,20 |
| RQD | 0,09 | RMR | 0,15 |
| RQD-kross | 0,04 | Injekteringsflöde | 0,14 |
| RMR-kross | 0,03 | RQD | 0,09 |
| Injekteringsflöde | 0,03 | RMR-kross | 0,08 |
| RMR | 0,02 | RQD-kross | 0,06 |

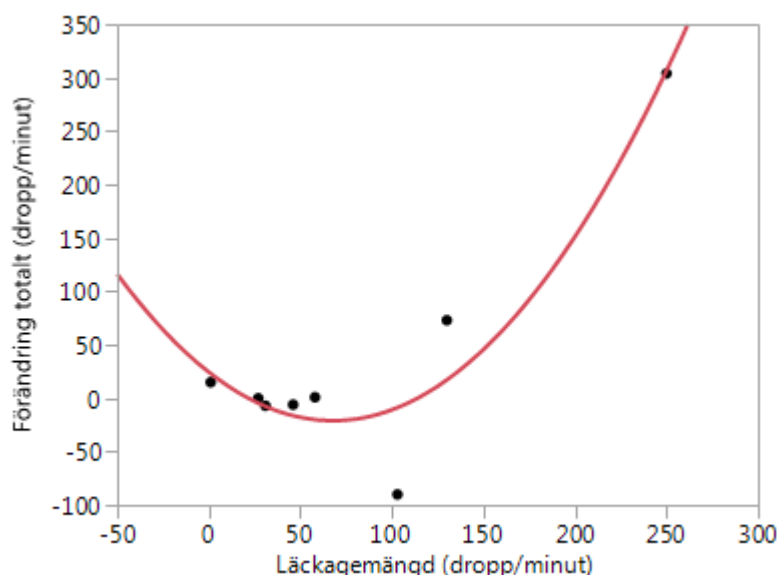
Vid förändring totalt ser man en betydligt lägre korrelation för den linjära passningen. Läckagemängd har högsta linjära R²-värde på 0,64. Därefter följer injekteringsvolym med 0,32. Q-värdet har hamnat på en 4:e plats och flyttad ned injekteringstiden.

Passning för andragradspolynom kvarstår liknande de tidigare jämförelserna i ordningen läckagemängd, injekteringsvolym och apertur med de tre högst R^2 -värdena. RQD ligger som nummer fyra men har ett R^2 -värde på 0,28.

Tabell 9. Determinationskoefficienter för jämförelse mellan förändrad droppmängd efter utförd injektering avseende "förändring totalt" samt presenterade variabler. Gråskuggade rutor avser negativ lutning/korrelation på regressionslinjen. Variablerna är placerade i korrelationsordning för linjär modell och modell av andragradspolynom.

| Variabel | R^2 -Linjär modell | Variabel | R^2 - 2:a Polynom |
|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| Läckagemängd | 0,64 | Läckagemängd | 0,89 |
| Injekteringsvolym | 0,32 | Injekteringsvolym | 0,84 |
| Hydraulisk apertur | 0,24 | Hydraulisk apertur | 0,65 |
| Q | 0,18 | RQD | 0,28 |
| Injekteringstid | 0,12 | Q | 0,19 |
| RQD | 0,05 | Injekteringstid | 0,14 |
| RQD-kross | 0,02 | Q-kross | 0,13 |
| RMR-kross | 0,02 | Injekteringsflöde | 0,12 |
| Q-kross | 0,02 | RQD-kross | 0,04 |
| Injekteringsflöde | 0,00 | RMR | 0,03 |
| RMR | 0,00 | RMR-kross | 0,02 |

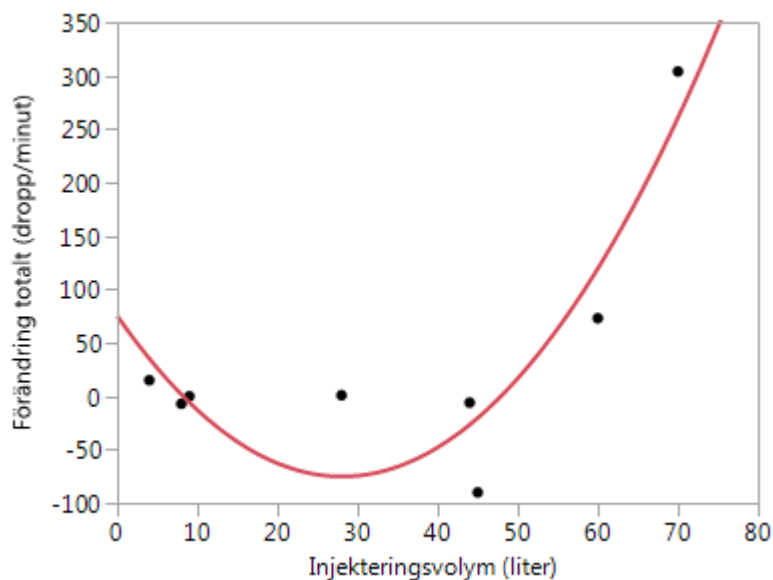
Figur 29 nedan visar datamängd för jämförelse mellan total läckageförändring och genomsnittlig läckagemängd innan injekteringen. R^2 -värde för linjen är 0,89 och RMSE är 45,51 vilket innebär den bästa korrelationen av samtliga presenterade variabler. Man kan se att läckage 8+062 avviker mest från linjen med en minskning i läckagemängd som är större än vad som förväntas av ekvationen. X för symmetrilinjen och minimum för andragradsekvationens förväntade läckageförändring är 68 dropp per minut.



Figur 29. Jämförelse mellan total förändring efter injekteringen och genomsnittlig läckagemängd innan injekteringen. Linjen är ett andragradspolynom med R^2 -värde på 0,89.

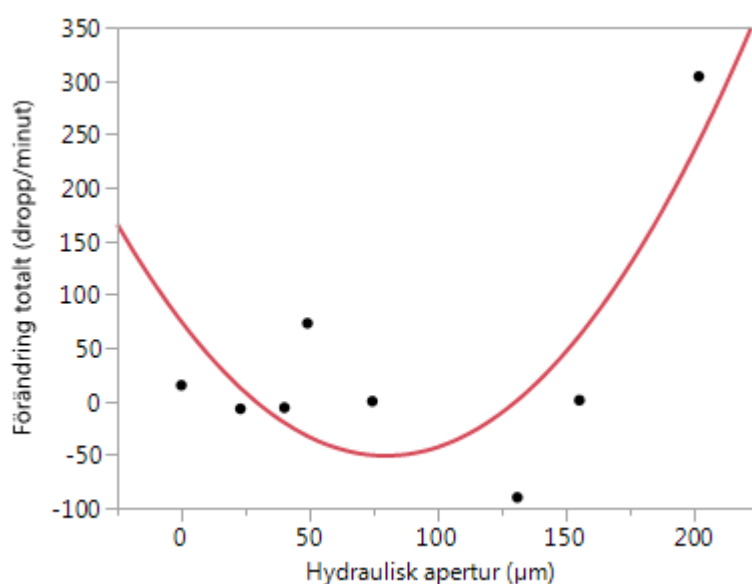
Figur 30 nedan visar datamängd för jämförelse mellan total läckageförändring och injekteringsvolym för injekteringen. R^2 -värde för linjen är 0,84 och RMSE är 55,94

vilket gör den till den andra bästa korrelationen av samtliga presenterade variabler. I och med det lägre R^2 -värdet och högre RMSE-värdet än för jämförelse med läckagemängden, avviker datapunkterna längre från andragradspolynomet. X för symmetrilinjen och minimum för andragradsekvationens förväntade läckageförändring är 28 liter injekterat medel.



Figur 30. Jämförelse mellan total förändring efter injekteringen och injekteringsvolym. Linjen är ett andragradspolynom med R^2 -värde på 0,84.

Figur 31 nedan visar datamängd för jämförelse mellan total läckageförändring och beräknad hydraulisk apertur. R^2 -värde för linjen är 0,65 och RMSE är 81,79 vilket gör den till den tredje bästa korrelationen av samtliga presenterade variabler. Jämfört med figur 29 och 30 kan man se att datapunkterna avviker mer och är svårare att förutse med andragradsekvationen i tabell 10. X för symmetrilinjen och minimum för andragradsekvationens förväntade läckageförändring är 80 μm .



Figur 31. Jämförelse mellan total förändring efter injekteringen och beräknad hydraulisk apertur. Linjen är ett andragradspolynom med R^2 -värde på 0,65.

Tabell 10 visar andragradsekvationer för andragradspolynom som bäst förklarar kopplingen mellan den totala förändringen och variablerna läckagemängd, injekteringsvolym och apertur. X för symmetrilinjen är det värdet för X där polynomets lägsta punkt finns och därmed största negativa tal för den totala förändringen i läckagemängd. X₁ och X₂ definierar det spann där Y alltid är under noll och därför innebär en minskning i läckagemängd.

Tabell 10. R²-värden och ekvationer för andragradspolynom i figur 29 till 31. X för symmetrilinjen framräknat med PQ-formeln och motsvarar respektive variabel där mest läckageminskning förväntas. X₁ och X₂ är X-värden där linjen skär X-axeln och motsvarar därför ett spann där alla värden för Y är under 0, vilket innebär negativ förändring.

| | R ² | Ekvation | X för symmetrilinje | X ₁ | X ₂ |
|--------------------|----------------|------------------------------|---------------------|----------------|----------------|
| Läckagemängd | 0,89 | $y=0,0099x^2-1,3398x+24,452$ | 68 | 22 | 114 |
| Injekteringsvolym | 0,84 | $y=0,191x^2-10,712x+75,101$ | 28 | 8 | 48 |
| Hydraulisk apertur | 0,65 | $y=0,0197x^2-3,1504x+74,66$ | 80 | 29 | 131 |

3.5 Geologisk kartering och bergkvalitet

Nedan presenteras en litologisk beskrivning, bergkvalitet (Q och RMR) samt stereonet med strukturmätningar för respektive läckage (tabell 12). Bergkvaliteten kan bedömas utifrån klassindelningen i tabell 11 (Waltham, 2009). Där krosszoner/lerslag påträffades gjorde separata bergkvalitetbestämningar med hänsyn till dessa (tabell 13). Se geologisk karta från SGU för jämförelse (figur 32).

3.5.1 Granit

Karteringen visade att området domineras av granit och gnejs. Graniten är röd eller vit, beroende på om den domineras av röd eller ljusgrå kalifältspat, eller plagioklas. Den varierar från primär och homogen till övergående gnejsig och folierad/bandad.

Den röda graniten är generellt väldigt uppsprucken p.g.a. flera sprickgrupper med sprickplan i flera riktningar, då dess struktur och blockighet representeras av kalifältspaten. Det är också i den röda graniten som samtliga krosszoner påträffas. Kristallstorleken varierar från fin- till medelkristallin.

Sprickplanen är dominerande tvärgående till tunneln med stupning varierande; med eller mot drivningsriktningen. Vid enstaka läckage hade parallell sprickriktning resulterat i ”kyrkor” med triangulära utfall i tunneltak.

3.5.1.1 Svaghetszoner

Krosszoner påträffades i den röda graniten vid fyra av läckagen. Det kan även finnas vid övriga läckage men är då täckta av sprutbetong. Krosszonerna består av relativt kompakterade fraktioner av lera till sand samt mindre stenfragment, cirka 5 mm. Då det rör sig om bredare zoner, cirka en meter är krosszonen uppbyggd av varvade lager av röd, väldigt vittrad granit, samt tidigare beskrivna lösa material. Lagren av den vittrade graniten är cirka en centimeter tjocka. Alla krosszoner som påträffades var tvärgående till tunnelriktningen. Resultatet bergkvalitet för krosszonerna var genomgående låga (tabell 13).

3.5.2 Gnejs

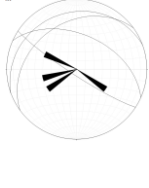
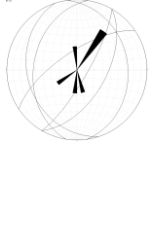
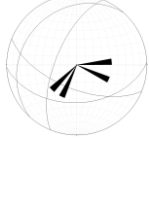
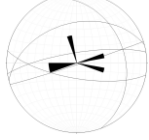
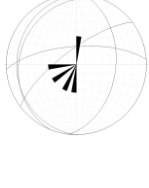
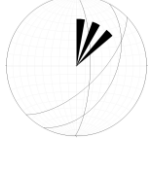
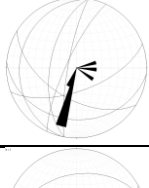
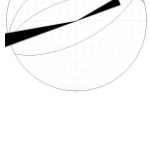
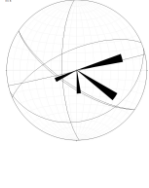
Gnejsen är generellt medel- till grovkristallin och utgörs av ljusa respektive mörka mineral, mer eller mindre uppdelade i band/foliation. De ljusa delarna består främst av grovkristallin plagioklas medan de mörkare delarna är finkristallina till afanitiska, och består av glimmer samt troligtvis mer mafiska beståndsdelar. Vid ett läckage var gnejsen granatbärande. Gnejsen har färre sprickgrupper, mer samlad sprickriktning och rårare sprickytor än graniten, vilket resulterar i bättre bergkvalitet.

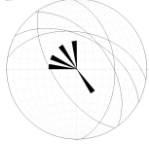
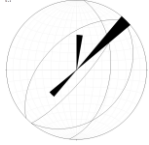

Tabell 11. Bedömningsgrunder för bergkvalitetbestämningar i tabell 12.

| Bedömningsgrunder för bergkvalitet | | Q | RMR |
|------------------------------------|--------------|-------|--------|
| Klass 1 | Mycket bra | >40 | 80-100 |
| Klass 2 | Bra | 10-40 | 60-80 |
| Klass 3 | OK | 4-10 | 40-60 |
| Klass 4 | Dålig | 1-4 | 20-40 |
| Klass 5 | Mycket dålig | <1 | <20 |

Tabell 12. Resultat från berggrundskartering. Litologisk beskrivning samt bergkvalitet för respektive läckage.

| Kilometertal | Litologisk beskrivning | Q | RMR | RQD | Strukturgeologi | Stereonet |
|--------------|---|------|-----|-----|---|-----------|
| 7+092 | Gnejs/granit, röd. Gnejs övergående till röd granit. Gnejsen är granatbärande och ögonförande med porfyroblaster av plagioklas samt mörk afanitisk matrix. Mellan enheterna finns ett slag/krosszon, 20 cm tjockt bestående av band av röd granit, lera samt sand och stenfragment. | 1,33 | 54 | 50 | Sprickplan parallella och tvärgående med stupning med drivningsriktning. En tvärgående krosszon. | |
| 7+353 | Granit, röd. Mellankristallin kalifältspatrik röd-svart granit. | 7 | 59 | 70 | Blockig "kalifältspatig" struktur. Blockstorlek 0,5-2 meter. Tvärgående och parallella sprickplan. | |
| 7+453 | Granit, röd. Fin- till medelkristallin röd granit. | 4,62 | 61 | 70 | Blockig "granitig" struktur. Block 0,2-0,5 meter. Tvärgående sprickor, med och mot drivningsriktning. | |
| 7+490 | Antagen som 7+453. Heltäckt med sprutbetong förutom en yta på cirka 20x20 cm som visar röd granit. | 4,62 | 61 | 70 | Ytstruktur synlig genom sprutbetong; "granitig". | |
| 7+503 | Antaget snitt av ovan och under. Heltäckt med sprutbetong. | 6,92 | 66 | 75 | | |
| 7+536 | Gnejs/granit, röd. Finkristallin folierad gnejs i lager med grov till pegmatitisk röd granit. | 10 | 71 | 80 | Tvärgående sprickor, med och mot drivningsriktning. | |

| | | | | | | |
|--------|---|-------|----|----|--|---|
| 7+594 | Gnejs/granit, röd. Gnejsig glimmerbärande medium- till grovkristallin röd granit. Två stycken påträffade krosszoner, cirka en meter breda bestående av band av röd granit samt lera och sand. | 0,77 | 60 | 70 | Tvärgående svagt sluttande sprickplan med drivningsriktning. Block 0,2-0,5 meter. Tvärgående krosszoner. |  |
| 7+618 | Granit, röd. Medelkristallin röd granit. Två stycken krosszoner, cirka en meter breda bestående av band av röd granit samt leriga och sandiga fraktioner. | 0,099 | 46 | 60 | Tvärgående krosszoner. Dominerande sprickplan är parallella och branta med tunnelriktning. Bildning av "kyrkor" i tak. Block 0,5-2 meter. |  |
| 7+797 | Gnejs/granit, ljus. Gnejsig medelkristallin ljus granit. | 4,62 | 52 | 70 | "Granitig" struktur med gnejsiga inslag. Block 0,5 meter. Sprickplan dominerande parallella och branta med tunnelriktning. "Kyrkor" i tak. |  |
| 8+062 | Gnejs/granit, röd. Medel- till grovkristallin röd granit med hög andel glimmer. Folierad struktur. Kvartsfyllda sprickor. | 11,85 | 54 | 40 | Blockstorlek <10 cm. Sprickplan tvärgående och branta mot drivningsriktning. |  |
| 8+173 | Granit, röd. Fin- till medelkristallin röd granit dominerad av kalifältspat. | 17,5 | 60 | 70 | "Granitig" struktur med blockstorlek 0,5-1 meter. Tvärgående sprickplan, svagt lutande stupande med drivningsriktning. |  |
| 8+282 | Gnejs. Kraftigt uppsmält och folierad grov- till medelkristallin gnejs med bandning. Grovkristallin vit plagioklas. Lite eller ingen kalifältspat. | 80 | 69 | 80 | En sprickriktning vilket innebär avsaknad av blockbildning. Sprickplan tvärgående med stupning mot drivningsriktning. |  |
| 8+372 | Gnejs. Tydligt bandad gnejs. Ljusa band av plagioklas, kvarts och kalifältspat, medel- till grovkristallina. Mörka band av närmare afanitisk glimmer och troligtvis amfibol. | 17,78 | 75 | 80 | Tvärgående branta sprickplan stupande med drivningsriktning. Blockstorlek 0,5-1 meter. |  |
| 10+408 | Granit, röd. Fin- till medelkristallin kalifältspatdominerad granit. Slag cirka 10 mm tjockt bestående av röd lera med bergfragment 5 mm stora. | 0,6 | 55 | 30 | "Granitig" blockighet, ca 20 cm. Dominerande tvärgående sprickplan som stupar med drivningsriktning, likaså för slag/krosszon. |  |
| 10+440 | Granit, röd. Medelkristallin kalifältspatdominerad rödgranit. | 6 | 51 | 60 | "Granitig" blockighet, 1-1,5 meter. Tvärgående svagt lutande sprickplan dominerar med stupning mot drivningsriktning. |  |

| | | | | | | |
|-------------------|---|----|----|----|--|---|
| 10+810 | Gnejs. Medel- till grovkristallin gnejs. Synlig foliation av glimmer. | 10 | 54 | 60 | Tvärgående och parallella plan. Blockstorlek 0,2 meter. |  |
| 10+816 | Gnejs. Medel- till grovkristallin glimrig gnejs. | 30 | 78 | 90 | Tvärgående branta sprickplan med stupning med drivningsriktning. |  |
| 10+831- 10+838 | Granit, ljus. Medelkristallin ljus granit. | 15 | 71 | 90 | Tvärgående och parallella plan. Blockstorlek 0,5 meter. |  |

Tabell 13. Bergkvalitetbestämningar gjorda med hänsyn till krosszonerna/svaghetszonerna vid angivna läckage.

| Avståndsmarkering | Bergart | Q | RMR | RQD |
|-------------------|--------------------|------|-----|-----|
| 7+092 | Gnejs/granit, röd. | 0,04 | 8 | 20 |
| 7+594 | Gnejs/granit, röd. | 0,01 | 18 | 10 |
| 7+618 | Granit, röd. | 0,01 | 4 | 10 |
| 8+062 | Granit, röd. | 0,04 | 18 | 20 |
| 10+408 | Granit, röd. | 0,06 | 21 | 30 |

För att säkerställa kvaliteten i karteringarna p.g.a. rådande förhållanden i tunnelbanan gjordes även några karteringar på markytan ovanför tunneln i Frescati för jämförelse (tabell 14). Se figur 2 för positioner. Ytkarteringarna överensstämmer generellt mot berggrundskartan från SGU men visar variationer i mindre skala. Jämförelse med tunnelkarteringarna visar en förekomst av motsvarande bergarter men med lokala skillnader.

3.5.3 Gabbro

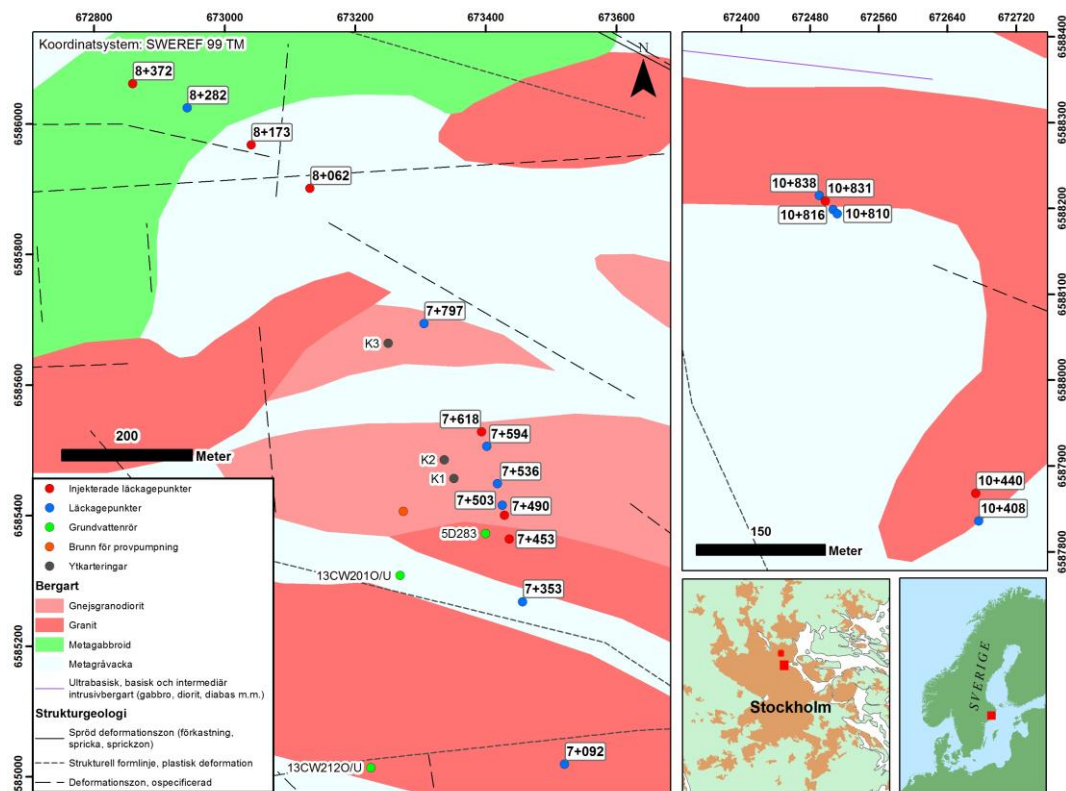
En relativt finkristallin mörk bergart påträffades vid ytkarteringarna som tolkades som gabbro. Bergarten bar porfyroblaster av kvarts med en finare matrix av biotit och svart amfibol. Bergarten förekommer över cirka 20 meter och en kontakt mot gnejs/pegmatit förekommer. Kontakten påvisar höga temperaturer då gabbro verkar ha intruderat i gnejsen och plockat upp xenoliter från kontaktytan.

Tabell 14. Bergkvalitet från karteringar i marknivå. Se översiktskarta (figur 2) för respektive position.

| Position | Närmaste läckage | Bergart | Q | RMR | RQD |
|----------|------------------|---|-----|-----|-----|
| K1 | 7+536 | Gabbro Fin- till medelkristallin kvartsporfyrisk bergart med hög halt glimmer. Vener av kalifältspat och kvarts, av varierad storlek. | 0,9 | 58 | 80 |
| K1 | 7+536 | Gabbro (kvalitet för lerslag) Lerslag i gabbro, cirka 10 mm. Stenfragment upp till cirka 5 cm. | 1,3 | 50 | 80 |
| K2 | 7+594 | Granit, röd Varvad röd granit gnejs och pegmatit. Graniten förekommer lokalt ca 2-3 meter av 20 meter bergskärning. | 1,7 | 48 | 60 |
| K2 | 7+594 | Gnejs/gabbro Gnejs samt mörk, finkristallin, kvartsporfyrisk, kristallin bergart tolkad som gabbro. Uppsmält kontakt med xenolithiska texturer. | 45 | 77 | 90 |
| K3 | 7+797 | Gnejs Ögonförande medel- till grovkristallin bandad gnejs med ljusa pegmatitiska gångar. | 2,9 | 56 | 80 |

Figur 32 visar en geologisk karta med data från SGU. Enligt den domineras studieområdet av granit, gnejsgranodiorit, metagabbroid och metagråvacka vilket i sin helhet stämmer överens med karteringarna. Om man jämför berggrundskartan med bergarterna som förekommer enligt karteringarna så skiljer det sig dock på lokal nivå.

Eftersom tunnslip ej har gjorts vid karteringarna är det inte möjligt att säga exakt hur mineralsammansättningarna är och därför finns det en osäkerhet i tolkningen vid bergartsbestämningen. Detta ska dock inte påverka de numeriska bergkvalitetvärden som presenteras i tabell 12.



Figur 32. Berggrunds- och strukturgeologisk karta från SGU med utsatta läckagepunkter och grundvattenrör.

4 Diskussion

4.1 Naturliga variationer i läckagemängd

Figur 3 visar att läckagemängden för punktläckage varierar säsongsbaserat under året. Högsta summerade värden för samtliga utvalda och droppkarterade 19 punktläckage var på våren mellan februari och juni. Detta är svårt att förklara endast genom att titta på nederbördsdata. Nederbördsmängden för varje månad under perioden (tabell 3) visar att nederbörden snarare var lägre för perioden november till april än övriga månader. För att hitta en mer rimlig förklaring till förändringen i droppmängd över längre tid får man titta på lufttemperaturen. Om man följer lufttemperaturen från början av droppkarteringen kan man se att den visar direkt negativ korrelation mot den ökande läckagemängden. När lufttemperaturen sedan vänder i januari-februari kan man se att även den summerade droppmängden börjar plana ut för att sedan vända neråt. Detta beror sannolikt på den ökning i avdunstning som en ökning i temperatur medför, vilket gör mindre vatten tillgängligt för infiltration.

Den totala summerade läckagemängden har sedan fortsatt att sjunka fram till ungefär mitten av oktober när man kan se tendenser till att den börjar plana ut. Man kan se att lufttemperaturen har rört sig i negativ riktning sedan i mitten på augusti. Om droppmängden reagerar som året innan vore den naturliga utvecklingen att droppmängden börjar öka i samband med detta och fortsätter öka fram till ungefär mars-april.

Vid utvärderingen av injekteringsresultatet måste detta ha i åtanke för att kunna skilja på naturliga variationer och de variationer som är inducerade av yttre påverkan i form av injektering. Eftersom det nu vänder mot en positiv trend är det att förvänta att den tillgängliga mängden inläckage stiger oavsett injekteringsresultat. En sådan respons går att se efter injekteringsperioden är avslutad. Ökningen av summerad droppmängd som man kunde se perioden innan injekteringen fortsätter med samma lutning på linjen, men med en ny utgångspunkt som förskjutits p.g.a. injekteringen. För att analysera den långsiktiga funktionen av detta tätningsförsök vore det därför lämpligt att jämföra läckagemängden ett år efter och jämföra med det tidigare naturliga värdet för samma period. Detta arbete har dock som huvudsyfte att beskriva de mer kortsiktiga resultatet upp till två veckor efter injekteringen utförts. För att säkerställa en tolkning av utvärderingen som kan urskilja naturliga variationer på kortare sikt får man titta på läckagens förändring över kortare perioder i förhållande till grundvattennivåer och nederbörd för att lära sig vilken respons läckagemängden för varje injekterat läckage brukar ha.

4.1.1 Injekterade läckage

Den förväntade förändringen hos de injekterade läckagen kan tolkas med varierad osäkerhet. Läckage 7+453 (figur 6) hade innan injekteringen en konstant läckagemängd på 250 dropp per minut vilket inte gör det möjligt att förutspå eventuella oscillationer. Rimligt att anta är att en överrepresenterad förbättring är mindre troligt än en överrepresenterad försämring efter utförd injektering då läckaget borde följa den stigande säsongstrenden. Att läckagemängden även varit konstant efter injekteringen gör det inte lättare att tyda läckaget inbördes variationer.

Läckage 7+490 är lättare att förutspå eftersom den varierat över studieperioden. Från juli fram till injekteringsperioden kan man se att läckaget samvarierar relativt väl med grundvattenrör 13CW201U, men att nederbördsresponsen för grundvattennivåerna ligger cirka två veckor efter. I och med det borde 7+490 fortsatt sin ökning som man ser innan injekteringen även efter och man kan därför argumentera för att resultatet som presenteras är något sämre än vad det verkar. Då detta läckage borrades och vattenförlustmättes under första veckan av injekteringsperioden och injekterades andra veckan beror den ökning som syns mitt i injekteringsperioden troligtvis på den inducerade störning som borrning och vattenförlustmätning orsakat.

Läckage 7+618 är svårtolkad p.g.a. dess magnitudskillnad i förändring jämfört med grundvattennivåerna. Vad man kan se är att läckagemängden planar ut precis innan injekteringen vilket skulle kunna motsvara en vändning i läckagetrenden. Om man tittar på droppkarteringen från förra hösten kan man se att läckaget ökade med liknande magnitud som det minskade under våren och att motsvarande trend är att förvänta även detta år. I så fall är det troligt med en mindre naturlig ökning under injekteringsperioden alternativt oförändrade förhållanden.

Läckage 8+062 ligger utanför Frescatiområdet (se figur 2) och borde därför inte ha en direkt koppling till studerade grundvattennivåer. Dock kan grundvattennivåerna fungera som en naturlig referens om en koppling kan tydas. Läckaget ser att samvarierar väl med grundvattenrör 13CW201U, dock med en viss förskjutning där läckaget ligger cirka 2-3 veckor före som med läckage 7+490. Eftersom 13CW201U visar en ökning över injekteringsperioden är en naturlig ökning i läckagemängd att förvänta och därmed en överrepresenterad försämring eller underrepresenterad förbättring.

Läckage 8+173 ligger också utanför Frescati. Eftersom läckaget mest varierat mellan fukt och ett dropp per minut är det svårt att tyda någon detaljerad förändring. Ingen tydlig koppling kan ses mellan ökningen från fukt till dropp mot förändring i nederbördsmängd. Dock så följer läckaget en trend så till vida att det oftast går upp till en droppe per minut under två veckors tid för att sedan gå ner igen. Under injekteringen kan man se att läckaget går upp till ett dropp per minut precis innan och sedan går ner efter två veckor. Det är därför rimligt att säga att minskningen i slutet av injekteringsperioden beror på naturliga variationer och inte på själva injekteringen.

För läckage 8+372 förväntas att det inte borde aktiverats efter eller under injekteringen eftersom nederbördsmängden inte nått sådana nivåer som tidigare krävts för aktivera det. För att kunna göra en fullgod utvärdering av injekteringsresultatet vid punkten måste man därför invänta på en period med större nederbördsmängd. Detta är inte en del av detta arbete, men det man kan säga är att injekteringen resulterat i nya potentiella vattenvägar i berget eftersom fukt tillkommit vid läckagepunkten.

Läckage 10+440 visar ingen tydlig koppling till något grundvattenrör men visar en liknande säsongstyrd förändring som man kan se i figur 3. En viss ökning under utvärderingsperioden är därför att förvänta.

Läckage 10+831 visar relativt god samvariation med grundvattenrör 13CW201U förutom under augusti månad då de är negativt korrelerade. Grundvattennivån ökar under utvärderingsperioden vilket innebär att samma sak är att förvänta hos

läckagemängden om injektering inte utförts därmed en överrepresenterad försämring eller underrepresenterad förbättring.

4.1.2 Ej injekterade läckage i Frescati

Som jämförelse med de ovan beskrivna injekterade läckagen kan man om de ej injekterade läckagen i Frescatiområdet säga att en uppskattade förändring under utvärderingsperioden inte är så lätt. Av de fem i Frescati som inte injekterades tolkas två av dessa som förutsägbara. Dessa två är 7+092 som visar en relativt förutsägbar säsongsbaserad trend där en ökning under hösten är att förvänta, samt läckage 7+503 som visar samvariation med grundvattenrör 5D283 och 13CW212U.

De ej injekterade läckaget visar att en tolkning av läckagets närmaste förändring inte är självklar och bör därför behandlas som en indikation snarare än något absolut. Även om det går att tolka att ett läckage borde haft en naturlig ökning under utvärderingsperioden är det svårt att kvantifiera den förändringen utan att gissa. Därför har verkliga läckagemängder använts i den numeriska utvärderingen. Att förvänta är att ”Förändring 1” och ”Förändring totalt” som karterades kortast inpå injekteringsperioden bäst motsvarar signalen från injekteringen och har mindre kraft från de naturliga förändringarna.

4.2 Injekteringsresultat

Injekteringen vid 7+453 resulterade i en minskning av läckaget av rinnande läckagemängd till fukt (tabell 5) vid den ursprungliga läckagepunkten. Detta resultat gällde för förändring 1, 2 och 3. Mer intressant och representabelt för resultatet i sin helhet är ”förändring totalt”. Kartering av hela området, tio meter åt vardera håll om läckaget resulterade i en total ökning av läckaget på 304 dropp per minut där rinnande läckagepunkter räknas som 250 dropp per minut. Detta motsvarar en ökning på 122 % jämfört med innan.

Eftersom samtliga tillkomna läckage uppkom i närhet till det ursprungliga läckaget (figur 18) samt att inga övriga läckage runt omkring förändrats visar detta att det ursprungliga läckaget troligtvis har förflyttat sig åt sidan och ökat i mängd. Anledningen till den ökade läckagemängden är troligtvis inte tillgången på vatten eftersom den borde vara obegränsad med en konstant högre grundvattennivå än själva tunneln, utan snarare möjligheten för vatten att ta sig in. Läckaget som förut var fokuserat till en dropppunkt har nu spridit ut sig till en fuktig yta som är cirka 5 meter bred och har flera läckagepunkter med varierande mängd. Eftersom syftet med tätningen var att ersätta dropplåten med denna tätningsmetod kan man därför konkludera att tätningen i sin helhet inte fungerat. Dock så har den ursprungliga läckagepunkten tätats ner till en läckagemängd av fukt.

Injekteringen vid 7+490 ledde inte till några större förändringar i form av tillkomna läckage runt omkring. Förändring 1 visade en ökning på 11 dropp per minut. Vid förändring 2 hade det förändrats till en minskning på tio dropp per minut och vid förändring tre hade minskningen ändrats till åtta dropp per minut. Skillnaden mellan förändring 1 och 2 kan tolkas som orsak av de nya förhållandena i spricksystemet som ännu inte nått jämvikt och att överflödigt vatten som tryckts undan vid injekteringen fortfarande läckte ut. Först vid förändring två kan man troligtvis se det injekterade spricksystemet i naturlig jämvikt och förändringen mellan förändring 2 och 3 är

representerar troligtvis den uppskattade ökning som förväntades vid jämförelse med grundvattenrör 13CW201U.

Den totala förändringen som karterades några dagar efter förändring 1 visar en total minskning på sju dropp per minut. Den totala förändringen motsvarar endast minskningen i ursprungsläckaget samt fukt som uppstått i borrhålet samt ett fuktparti på ena väggen som minskat något i storlek. Eftersom det under injekteringsperioden troligtvis skett en naturlig ökning har läckagemängden minskat något mer av injekteringen än vad den karterade mängden visar.

Trots att vattenförlusten var betydligt lägre än vid 7+453 samt att endast 8 liter injekteringsmedel användes var slutresultatet bättre med en total förbättring som motsvarar 24 % av ursprungsläckaget. Trots att det är en förbättring så kvarstår ändå ett punktläckage med 23 dropp per minut vid sista droppkarteringen och tätningen har därmed inte tagit bort hela problemet.

Injekteringen vid 7+618 gav vid själva ursprungspunkten en förbättring på 100 % vilket alltså tog bort hela läckaget och var vid förändring 3 endast fukt. Dock visar förändring totalt att läckaget flyttat på sig samt ökat i mängd då den totala droppmängden några dagar efter injekteringsperioden har ökat 73 dropp per minut vilket motsvarar en ökning på 130 %. Det flyttade läckaget består av en stor droppyta samt flera dropppunkter som utgör ett större problem än innan. Även om den naturliga läckagemängden för period kan ha ökat är resultatet inte av samma magnitud.

Vid denna punkt samt vid 7+453 gick det åt mest injekteringsmedel av alla åtta injekterade läckage. Vid dessa två läckage uppstod stora fuktytor med flera dropppunkter. Att stor injekteringsmedelåtgång i sig skulle vara orsaken till detta är mindre troligt eftersom man har sett att mer åtgång ger mer spridning och därmed ett tätare berg (Fransson & Gustafsson, 2006). Vad som är mer troligt är att ett för högt tryck har använts för de lokala förutsättningarna. Eftersom injekteringstrycket för den här typen av injektering endast kan mätas vid pumpen eller utanför manschetten sker stor friktionsförlust i slangar och utrustning, vilket innebär att trycket som visas inte motsvarar trycket i berget och blir därför svårare att kontrollera än om man kunnat mäta det faktiska trycket.

Nya läckage har också uppstått ur utfallet som skedde i sprutbetongen. Att sprutbetong föll ut beror antingen på att vidhäftningen i berget var undermålig lokalt alternativt att injekteringstrycket i berget, eller mellan berget och sprutbetongen övergick hållfastheten för en god vidhäftning (Fransson & Gustafsson, 2006).

Läckaget vid 8+062 visade den bästa totala förändringen av alla läckage med en förminskning av läckaget på 90 dropp per min som motsvarar 78 %. Själva ursprungsläckaget minskade med 115 dropp per minut vilket för förändring 1 motsvarade 93 %. Trots den relativa goda tätningen kvarstod läckaget och flyttade sig delvis eftersom nya läckage uppstod i närhet till ursprungsläckaget i södergående riktning där svaghetszoner observerats i väggarna (se figur 22). I svaghetszonen räckte injektering troligtvis inte till för att tränga in tillräckligt och täta alla de permeabla utrymmen man förväntar sig i en svaghetszon. Svaghetszonen blev i så fall den enklaste vägen för vattnet in i tunneln när den tidigare vägen in försämrades.

Om man jämför skillnaden mellan förändring 1, 2 och 3 liknar förändringstrenden den för 7+490 som skulle kunna förklaras av att jämvikt inte ställt in sig redan vid förändring 1.

Vid 8+173 gav de två borrade hålen låg vattenförlust. Den ena hålet valdes ändå att injekteras eftersom läckaget delvis flyttat sig dit och därför tolkades som i kontakt. Injekteringen pågick i endast två minuter med en injekteringsvolym på 4 liter vilket i princip motsvarar fyllnad av borrhålet. Resultatet blev därefter med ingen synlig förändring i läckagemängd för den ursprungliga läckagepunkten. Eftersom manschetten inte orkade för trycket vid injekteringen förstördes troligtvis tätheten i hålet och vattnet hittade en enklare väg ut som motsvaras av droppet som uppstod. P.g.a. droppet ur hålet samt fukt ur det andra hålet motsvarar det en ökning på 1500 %. Vid procentuell beräkning får dock läckage som varit små från början väldigt stora procenttal även vid mindre ökningar.

Läckage 8+372, som endast vid enstaka tillfällen varit aktivt, var vid injekteringstillfället inaktivt. Trots detta resulterade injekteringen i att fukt uppstod vid läckagepunkten vid förändring 2. Fukten beror rimligtvis inte på en ökning i nederbördsmängd eftersom nederbördsmängden inte varit lika hög som vid tidigare tillfällen då läckaget varit aktivt. Inga större övriga förändringar skedde runt omkring som gör det troligt att förändringen beror på något annat än injekteringen.

Läckage 10+440 visade en liknande trend som 7+490 och 8+062 med en ökning vid förändring 1 för sedan gå ner något vid förändring 2 och sedan öka vid förändring 3. Även för detta läckage tolkades att en naturlig ökning borde ha skett under utvärderingsperioden vilken troligtvis återspeglas i skillnaden mellan förändring 2 och 3. Den totala förändringen visar ingen förändring vilket skulle kunna innebära att tätningen inte hade någon verkan alternativt att den maskerades av en naturlig variation. Oavsett så kvarstår läckaget i liknande storleksordning. Likt injekteringen vid 7+490 och 8+173 var åtgången av injekteringsmedel låg vilket tyder på låg inträngning. Att det skulle resultera i ett dåligt resultat är dock tvetydigt då 7+490 visar en total förminskning, 10+440 visar ingen förändring under period då den naturliga förändringen troligtvis var positiv och 8+173 visar en ökning, som förvisso kommer från borrhålet.

Läckage var tillsammans med 7+490 och 8+062 de enda som hade en negativ förändring totalt. Vid 10+831 observerades även den tydligaste spridningen av injekteringsmedel som trängde ut runt injekteringspunkten. Vattenförlusten var relativt låg för den injekteringsvolym och inträngning som uppnåddes vilket skulle kunna bero på att spridningen koncentrades till just läckagesprickan i högre grad än vid de andra läckagen. Förflyttningen av läckaget gjorde dock att en stor del av den totala läckagemängden kvarstod och den totala förändringen blev endast en minskning på 6 dropp per minut eller 13 % av ursprungsvärdet.

4.2.1 Koppling till grundförutsättningar och utförande

Korrelationsundersökningen av de inblandade variablerna i förhållande till förändring av läckagemängd orsakat av injekteringen, visade att den genomsnittliga läckagemängden innan åtgärd hade bäst korrelation. Detta gällde både vid passning med en linjär modell och ett andragradspolynom.

Om man jämför resultatet mellan förändring 1, 2 och 3 mot förändring totalt kan man se att den linjära passningslinjen går från negativ korrelation för förändring 1, 2, och 3 till positiv korrelation för den totala förändringen. Detta visar att vid tätning av just den utvalda läckagepunkten fungerar metoden bäst på större läckage medan den fungerar sämre på läckagen i total bemärkelse då det är större sannolikhet att läckaget flyttar sig samt ökar i mängd. Liknande trender gäller för injekteringsvolym och apertur där korrelationen visar att större apertur och injekteringsvolym ger bättre resultat för själva punktläckaget men i helhet ger sämre resultat.

Vad man också kan se är att en jämförelse av resultatet med variablerna bättre kan förutse kopplingen med en andragsgradsmodell, vilket är extra tydligt för den totala förändringen där de linjära R^2 -värdena visar lägre samband. Jämförelse mellan andragsgradspolynomen för förändring 1 och förändring totalt visar liknande koppling med läckagemängden, där tätning av det ursprungliga punktläckaget fungerar bättre för större läckage, läckage med större apertur eller läckage där större mängd injekteringsmedel gått in. Hos aperturen och injekteringsvolymen finns det också en större effekt av andragsgradspolynomet där indikationer finns av att det ska fungera bättre igen när man når under en viss injekteringsvolym eller apertur. För den totala förändringen är denna andragsgradsfaktor tydligare för både läckagemängden, aperturen och injekteringsvolymen där man kan förutspå bäst injekteringsresultat vid 68 dropp per minut för läckagemängden, 28 liter för injekteringsvolymen och 80 μm för aperturen, enligt beräkning av X för symmetrilinjen för andragsgradsekvationen. Om man tittar på de läckage som injekterades ligger 8+372 närmast dessa minimivärden med en injekteringsvolym på 28 liter och en genomsnittlig läckagemängd på 58 dropp per minut. 10+440 ligger närmast avseende apertur med ett värde på 75 μm . Huruvida injekteringen fungerat vid 8+372 får avgöras senare då nederbörds mängden varit högre och bör ha aktiverat läckaget. I nuläget är dess förändringsvärde aningen missvisande för den statistiska utvärderingen. Vid 10+440 gav injekteringen ett nollresultat vilket kan ha berott på låg inträngning och injekteringsvolym. X_1 och X_2 (tabell 10) för läckagemängd, injekteringsvolym och apertur indikerar att det inte bara är ett minimivärde som motsvarar en teoretisk förbättring utan ett spann där man åtminstone borde förbättra inläckagesituationen till viss grad.

Att just läckagemängden visar bäst korrelation med förändringen skulle kunna bero på att injekteringen fungerat till ungefär samma grad vid varje läckage och att förändringen därför beror på hur stort läckaget var innan p.g.a. dess naturliga grundförutsättningar snarare än som en hänvisning till var injekteringen fungerar bäst. Det skulle också kunna vara just så att den använda injekteringsmetodiken har ett visst läckageintervall där det fungerar bäst. Detta skulle kunna bero på att metoden har för stor inverkan på små läckage så som fukt som redan är i relativt impermeabla förhållanden och där borrning, vattenförlustmätning och injektering innebär ett ingrepp och ökning av systemets genomsläpplighet. Samt att det inte heller fungerar så bra för stora läckagemängder där eventuell större apertur (tabell 5) generellt kan leda till större använda injekteringsvolym som skulle kunna resultera i överskridna injekteringsstryck, då det finns mycket kraft i systemet i form av injekteringsmedel. Samma teori skulle i så fall förklara varför injekteringsvolymen visar negativ korrelation med den totala förändringen i läckagemängd.

Aperturens korrelation med läckagemängden med ett R^2 -värde på cirka 0,6 (figur 17) är inte lika övertygande som mellan läckagemängden och den totala förändringen men

indikerar ändå ett visst samband. Möjligheten till bättre korrelation skulle kunna vara möjlig då den rimligt antagna läckagemängden för 7+453 kan vara något högre än i verkligheten. Om den i verkligheten vore något lägre skulle R^2 -värdet troligtvis vara högre. Liknande osäkerhet i datamängden finns för 8+372 där den genomsnittliga droppmängden är beräknad på fyra aktiva läckagetillfällen. Eftersom den maximala läckagemängden varit 85 dropp per minut och medelvärdet är 58 dropp per minut är det troligt att läckagemängden konstant varit högre om tillgången på vatten varit obegränsad, vilket också resulterat i bättre passning. Aperturens låga korrelation med injekteringsvolymen indikerar att det är svårt att förutse vilken mängd injekteringsmedel man kommer få in eller om det i princip bara kommer resultera i halfyllnad.

Att samtliga bergkvalitetvärden inte visar någon korrelation med injekteringsresultatet kan bero på flera orsaker. Om man jämför SGU:s geologiska karta med resultatet av den geologiska karteringen kan man se att karteringen inte ger lika tydliga resultat där enhetsgränser lätt kan definieras. Delvis kan det bero på att karteringen gjordes i tunneln tillsammans med att de geologiska enheterna inte står rakt upp, vilket visas av de strukturgeologiska mätningarna. Troligast är att det mest beror på att generaliseringen som visas i SGU:s karta inte motsvarar verkligheten och att karteringen visar att bergartsenheter varierar över mindre skala, vilket är att vänta i en metamorfos miljö (Davis et al, 2012). Det är också sannolikt att det är just den variationen och heterogeniteten som också gör att injekteringsresultatet inte visar någon koppling med bergkvaliteten. Flödet av vatten i berget kontrolleras främst av framkomligheten vilket delvis beror på bergkvalitet, men framförallt hur pass sammankopplad och öppen just den individuella sprickan är. En bergkvalitetkartering i tunnelväggen vid begränsade förhållanden representerar inte sprickan i sig själv utan snarare en generell bild av litologin i närhet till läckaget. En sådan generell bild hade troligtvis varit mer tillämpbar vid tätning av större områden än ett individuellt punktläckage. Den någorlunda kopplingen med aperturen indikerar att betydelsen finns i mindre geologisk skala.

7+618 och 8+062 var de läckage som hade observerade svaghetszoner inom tio meter. Vid 7+618 var svaghetszonen i utkanten av karteringsområdet och man kunde inte se någon tendens till påverkan vid injekteringen. Vid 8+062 observerades svaghetszoner i båda sidorna i södergående riktning om läckaget. Strykning och stupning indikerade (figur 22) att krosszonen fortsatte upp i tunneltaket i närhet till läckaget. Eftersom läckaget efter injekteringen flyttade sig i södergående riktning kan krosszonen och därmed bergkvaliteten haft en mer betydande roll i detta fall då denna zon med låg bergkvalitet var i kontakt med läckaget. Eftersom detta endast rör en läckagepunkt ger detta ingen statistisk styrka men visar ett exempel på varför bergkvaliteten för en karterad krosszon vid 7+618 inte bidrar till korrelation.

5 Slutsats

Injekteringsresultatet visade att fem stycken av de injekterade läckagen minskade i läckagemängd vid den ursprungliga läckagepunkten. Ett läckage var oförändrat och två läckage ökade i läckagemängd. Då även övriga läckage runt läckaget för åtgärd droppkarterats visades att endast tre läckage hade minskat i total läckagemängd eftersom det ursprungliga läckaget hittat nya flödesvägar och förflyttat sig. Av de åtta

läckage som injekterades minskade läckaget vid kilometertal 8+062 mest, med en förminskningsgrad på 78 %, och en absolut förminskning på 90 dropp per minut.

I tolkningen av resultatet finns en osäkerhet orsakat av naturliga variationer i nederbörds mängd, grundvattennivåer och temperatur. Flera av de injekterade läckagen tolkas som att ha ökat under injekteringsperioden vilket i så fall lett till en minskning i läckagemängd som är delvis underskattad alternativt en ökning som är delvis överskattad. Denna felmarginal bedöms dock vara relativt liten för de två veckor som injekteringen pågick men ökar något i förhållande till karteringsordningen för förändring 1, 2 och 3. För minst inblandning av naturliga variationer används resultatet för förändring 1 och den totala förändringen som karterades kortast inpå efter injekteringen avslutats. I förändring 1 finns det potentiellt en inducerad felkälla orsakat av injekteringen grundat på läckage 7+490 som förändrades från att ha ökat till förändring 1 till att ha minskat till förändring 2. Detta tolkades kunna bero på att systemet ännu inte var helt i jämvikt vid förändring 1, så kort efter injekteringen.

Vid jämförelse mellan injekteringsresultatet och de variabler som motsvarar naturliga grundförutsättningar och injekteringsmetodik visade sig en trendlinje definierat av ett andragradspolynom resultera i högst R^2 -värden. Kopplingen till läckagemängd, injekteringsvolym samt hydraulisk apertur var starkast. För förändring 1, 2 och 3 var korrelationen dominerande negativ medan för den totala förändringen var dominerande positiv. Detta innebär att injekteringsmetoden resulterade i störst minskning av den ursprungliga läckagepunkten med större genomsnittlig läckagemängd, större injekteringsvolym och större apertur. Vad som är mer representabelt för det faktiska resultatet är den positiva korrelation som fanns med den totala förändringen. Eftersom detta förklarades av en andragradsekvation visade det att injekteringen skulle minska läckaget mest vid en teoretisk läckagemängd på 68 dropp per minut, en injekteringsvolym på 28 liter och en apertur på 80 μm som motsvarade andragradspolynomets minimum vid symmetrilinjen. Att avsiktligt begränsa mängden injekteringsmedel till en viss nivå skulle därför kunna leda till ett bättre resultat. Eftersom läckage 8+372 bäst stämmer in på minimumvärdena för både läckagemängd och injekteringsvolym bör läckageförändringen kontrolleras vid tillfälle med mer nederbörd.

Osäkerheter huruvida denna modell borde användas för att förutsäga ett visst utfall eller endast användas som visualisering av resultatet, finns i det faktum att förändringen i läckagemängd efter injekteringen styrs av de naturliga förutsättningarna och inte bara av injekteringsmetodiken. Samt att läckagemängden, injekteringsvolymen och aperturen kan ha en inbördes koppling.

Jämförelsen mellan bergkvalitetvärdena och läckageförändringen visade ingen eller bristande korrelation. Detta beror troligtvis på att injekteringen endast berörde punktläckage som snarare är beroende av geologiska och hydrogeologiska egenskaper på mindre skala än ett bergkvalitetvärde som motsvarar ett område. Anledningen till den låga korrelationen med bergkvaliteten styrks av det faktum att berggrundens kvalitet och egenskaper kunde visa stor variation över korta sträckor. I det fall där en svaghetszon fanns i närhet till det injekterade läckaget spelade bergkvaliteten roll, men generellt är läckagen mer beroende av den individuella vattenförande sprickan.

Sammanfattningsvis visar injekteringen på bristande resultat. Inget av de utvalda läckagen visade en tätningsgrad på 100 % vilket innebär att man fortfarande har ett ursprungligt inläckageproblem som kvarstår. Vid flera av läckagen visades en ökning av läckagemängden som delvis kan bero på att verkningsgraden av injekteringen var låg p.g.a. eventuell bristande inträngning och låg injekteringsvolym, och att ökningen därför bestod av en naturlig ökning. Eftersom den beräknade hydrauliska aperturen inte korrelerar med injekteringsvolymen är det därför vid utförandet svårt att säga vid vilken vattenförlust man ska injektera eller borra ett nytt hål. Det bristande resultatet vid större läckage kan bero på att injekteringen orsakar mer skada än nytta i systemet. Vad detta beror på är svårt att säga, men en potentiell orsak skulle kunna vara ett injekteringstryck som speciellt vid större volymer överskrider hållfastheten för berg och sprutbetong, vilket visades tydligt vid ett av läckagen. En utvärdering med mätning av injekteringstryck i berg vore lämpligt för att med större säkerhet kunna styra utförandet samt fastställa orsaken till injekteringsmetodikens utfall med högre noggrannhet.

6 Referenser

- Andersson, H., 1999. Polyuretan som injekteringsmedel. *SveBeFo*. Rapport 41.
- Andersson, P., 2000. Tätning av bergtunnlar, förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser. *Vägverket*, publ. 2000:101, Borlänge.
- Arbetsmiljöverket, 2014. Härdplaster – Arbetsmiljöverkets föreskrifter om härdplaster samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna. Publ. AFS 2005:18.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6, pp. 189-236.
- Bienawski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. Wiley: New York.
- Butron, C., 2012. Drip Sealing Grouting of Tunnels in Crystalline Rock: Conceptualisation and Technical Strategies. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Butrón, C., Gustafson, G., Fransson, Å., Funehag, J., 2010. Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting. *Tunneling and Underground Space Technology*, 25, pp.114-121.
- Dalmalm, T., 2004. Choice of Grouting Method for Jointed Hard Rock Based on Sealing Time Predictions. Phd thesis, KTH.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J., Kluth, C.F., 2012. *Structural geology of rocks and regions*. Tredje utgåvan. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Deere, D.U., 1968. Geological considerations. In: Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C. *Rock mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, pp.1-20.
- Dingman, S.L., 2002. *Physical Hydrology*. Long Grove: Waveland Press
- Franklin, J.A., Broch, E., Walton, G., 1971. Logging the mechanical character of rock. *T I Min Metal A*, 80:1-9.
- Fransson, Å., Gustafson, G., 2006. Efterinjektering: Inläckageprognos och design – förslag till analys. *SveBeFo*, Rapport 75.
- Fredén, C., 2009. *Sveriges Nationalatlas: Berg och jord*. Bromma: Nordstedts.
- Gustafson, G., 2009. *Hydrogeologi för bergbyggare*. Värnamo: Formas.
- Hack, R., Huisman, M., 2002. Estimating the intact rock strength of a rock mass by simple means. *Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment. Durban, South Africa*.

Hargelius, H., 2006. Dräner i tunnlar för vatten och frostsäkring – inventering baserad på litteratur, intervjuer och fältstudier. *SveBeFo*, Rapport 77.

Martin, C.D., 2007. Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark. *SKB*, R-07-26.

Minova, 2015. Carbopur, produktinformation. [e-resurs] Tillgänglig från: <<http://www.minovausa.com/pdfs/products/carbopur.pdf>> [Åtkomstdatum 9 nov 2015].

Nironen, M., 1997. The Svecofennian Orogen: a tectonic model. *Precambrian Research*, 86, pp.21-44.

Penetron, 2014. Produktinformation. [e-resurs] Tillgänglig från: <<http://www.penetron.com/>> [Åtkomstdatum 25 okt 2014].

Price, G.D., 2009. *Engineering geology*. Berlin: Springer.

SGU, 2015. Geologisk kartdata. [e-resurs] Tillgänglig från: <<http://www.slu.se/en/library/search/digitalmaps/>> [Åtkomstdatum 10 jan 2015].

SMHI, 2015. Meteorologiska data. [e-resurs] Tillgänglig från: <<http://opendata-catalog.smhi.se/explore/>> [Åtkomstdatum 12 dec 2015].

Stephens, M.B., 2009. Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. Sveriges geologiska undersökning (SGU).

Stephansson, O., Ljunggren, C., Jing, L., 1991. Stress measurements and tectonic implications for Fennoscandia. *Tectonophysics*, 189, pp.317-322.

Trafikverket, 2011. TRVK Tunnel 11 – Trafikverkets tekniska krav Tunnel. Publ. 2011:087.

Waltham, T., 2009. *Foundations of engineering geology*. Tredje utgåvan. Abingdon: Taylor and Francis.

Weiss, N.A., 2012. *Introductory Statistics*. Boston: Pearson.

Xypex, 2014. Produktinformation. [e-resurs] Tillgänglig från: <<http://www.xypex.com/>> [Åtkomstdatum 25 okt 2014].

Appendix A: Droppkartering

| Datum | Kilometertal | | | | | | | | | |
|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7+092 | 7+353 | 7+453 | 7+490 | 7+503 | 7+536 | 7+594 | 7+618 | 7+797 | 8+062 |
| 2014-10-21 | 30 | 32 | <<< | 25 | - | 40 | - | 80 | 120 | 100 |
| 2014-12-05 | 44 | 44 | <<< | 36 | 24 | 40 | 108 | 128 | 134 | 82 |
| 2015-01-08 | 50 | 34 | <<< | 36 | 20 | 36 | 112 | 160 | 140 | 102 |
| 2015-01-22 | 54 | 36 | <<< | 38 | 20 | 38 | 114 | 150 | 156 | 110 |
| 2015-02-05 | 57 | 35 | <<< | 36 | 20 | 40 | 120 | 168 | 168 | 90 |
| 2015-02-19 | 54 | 40 | <<< | 32 | 23 | 47 | 150 | 180 | 172 | 92 |
| 2015-03-05 | 50 | 36 | <<< | 41 | 21 | 35 | 128 | 182 | 152 | 81 |
| 2015-03-12 | 48 | 37 | <<< | 37 | 22 | 38 | 152 | 198 | 172 | 90 |
| 2015-03-19 | 49 | 39 | <<< | 37 | 22 | 43 | 154 | 198 | 176 | 94 |
| 2015-03-26 | 51 | 38 | <<< | 31 | 22 | 33 | 128 | 180 | 166 | 92 |
| 2015-04-02 | 53 | 39 | <<< | 35 | 17 | 28 | 164 | 186 | 172 | 91 |
| 2015-04-09 | 61 | 39 | <<< | 31 | 19 | 34 | 156 | 174 | 178 | 100 |
| 2015-04-16 | 60 | 41 | <<< | 38 | 19 | 36 | 136 | 160 | 168 | 96 |
| 2015-04-23 | 54 | 43 | <<< | 30 | 20 | 29 | 104 | 180 | 168 | 102 |
| 2015-04-30 | 54 | 39 | <<< | 32 | 18 | 28 | 110 | 192 | 158 | 106 |
| 2015-05-07 | 48 | 38 | <<< | 34 | 19 | 34 | 98 | 180 | 146 | 108 |
| 2015-05-13 | 47 | 41 | <<< | 31 | 22 | 28 | 104 | 192 | 152 | 102 |
| 2015-05-22 | 46 | 41 | <<< | 30 | 21 | 30 | 114 | 198 | 162 | 108 |
| 2015-05-29 | 45 | 44 | <<< | 30 | 18 | 31 | 124 | 172 | 154 | 114 |
| 2015-06-05 | 47 | 43 | <<< | 30 | 20 | 28 | 132 | 190 | 156 | 110 |
| 2015-06-12 | 41 | 47 | <<< | 31 | 20 | 30 | 114 | 150 | 146 | 120 |
| 2015-06-18 | 37 | 44 | <<< | 22 | 23 | 28 | 96 | 164 | 122 | 100 |
| 2015-06-26 | 39 | 45 | <<< | 32 | 22 | 35 | 94 | 144 | 148 | 104 |
| 2015-07-02 | 34 | 47 | <<< | 31 | 21 | 33 | 90 | 148 | 142 | 102 |
| 2015-07-09 | 38 | 48 | <<< | 34 | 22 | 26 | 88 | 144 | 136 | 106 |
| 2015-07-17 | 34 | 44 | <<< | 34 | 20 | 28 | 86 | 124 | 146 | 120 |
| 2015-07-23 | 37 | 49 | <<< | 32 | 21 | 24 | 88 | 114 | 144 | 112 |
| 2015-07-31 | 34 | 47 | <<< | 32 | 19 | 23 | 82 | 100 | 140 | 114 |
| 2015-08-10 | 36 | 47 | <<< | 29 | 22 | 25 | 82 | 98 | 128 | 108 |
| 2015-08-17 | 37 | 46 | <<< | 26 | 18 | 20 | 74 | 88 | 134 | 114 |
| 2015-08-24 | 36 | 52 | <<< | 27 | 17 | 20 | 64 | 86 | 130 | 108 |
| 2015-09-02 | 30 | 44 | <<< | 33 | 16 | 20 | 72 | 70 | 118 | 110 |
| 2015-09-07 | 38 | 38 | <<< | 26 | 16 | 13 | 70 | 58 | 126 | 116 |
| 2015-09-15 | 40 | 45 | <<< | 28 | 19 | 19 | 64 | 68 | 128 | 118 |
| 2015-09-21 | 40 | 50 | <<< | 27 | 17 | 16 | 64 | 66 | 128 | 114 |
| 2015-09-28 | 36 | 41 | <<< | 29 | 16 | 19 | 70 | 50 | 130 | 112 |
| 2015-10-05 | 34 | 40 | <<< | 28 | 15 | 18 | 68 | 48 | 122 | 108 |
| 2015-10-13 | 50 | 42 | <<< | 25 | 16 | 20 | 70 | 64 | 112 | 102 |
| 2015-10-20 | 44 | 43 | <<< | 26 | 17 | 19 | 74 | 56 | 114 | 88 |
| 2015-10-27 | 46 | 42 | <<< | 25 | 18 | 18 | 77 | 56 | 112 | 90 |
| 2015-11-02 | 42 | 46 | <<< | 28 | 17 | 23 | 80 | 56 | 112 | 102 |
| 2015-11-06 | 46 | 45 | <<< | 29 | 19 | 24 | 72 | 56 | 106 | 104 |
| 2015-11-13 | 38 | 45 | <<< | 38 | 21 | 14 | 78 | 20 | 130 | 116 |
| 2015-11-20 | 51 | 45 | < | 21 | 18 | 16 | 100 | < | Torr | 9 |
| 2015-11-27 | 54 | 42 | < | 23 | 18 | 16 | 90 | < | 23 | 24 |
| 2015-12-04 | 53 | 43 | < | 23 | 21 | 19 | 106 | < | 28 | 32 |

| Kilometertal | | 8+173 | 8+282 | 8+372 | 10+408 | 10+440 | 10+810 | 10+816 | 10+831 | 10+838 |
|--------------|---|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Datum | | | | | | | | | | |
| 2014-10-21 | | 4 | 4 | 56 | 28 | - | 8 | 4 | 40 | 20 |
| 2014-12-05 | | 1 | 6 | Torr | 26 | 26 | 6 | 4 | 48 | 8 |
| 2015-01-08 | | 1 | 7 | Torr | 34 | 34 | 8 | 3 | 32 | 7 |
| 2015-01-22 | < | 6 | Torr | 32 | 32 | 8 | 2 | 38 | 7 | |
| 2015-02-05 | < | 6 | 5 | 32 | 35 | 7 | 2 | 24 | 5 | |
| 2015-02-19 | < | 7 | Torr | 33 | 39 | 6 | 2 | 38 | 8 | |
| 2015-03-05 | < | 8 | Torr | 32 | 34 | 8 | 2 | 34 | 5 | |
| 2015-03-12 | 1 | 6 | Torr | 31 | 30 | 9 | 1 | 50 | 4 | |
| 2015-03-19 | 1 | 8 | Torr | 31 | 31 | 8 | 2 | 62 | 7 | |
| 2015-03-26 | 1 | 8 | Torr | 31 | 34 | 8 | 3 | 42 | 6 | |
| 2015-04-02 | 1 | 8 | 29 | 29 | 31 | 8 | 2 | 36 | 5 | |
| 2015-04-09 | < | 8 | Torr | 34 | 36 | 10 | 5 | 55 | 5 | |
| 2015-04-16 | < | 8 | Torr | 34 | 33 | 11 | 4 | 34 | 6 | |
| 2015-04-23 | 2 | 9 | Torr | 32 | 34 | 9 | 3 | 43 | 6 | |
| 2015-04-30 | < | 11 | Torr | 31 | 28 | 8 | 4 | 40 | 5 | |
| 2015-05-07 | 1 | 8 | Torr | 30 | 28 | 8 | 2 | 43 | 5 | |
| 2015-05-13 | 1 | 7 | Torr | 29 | 25 | 8 | 1 | 42 | 7 | |
| 2015-05-22 | 1 | 8 | 62 | 28 | 24 | 9 | 2 | 47 | 6 | |
| 2015-05-29 | < | 7 | Torr | 26 | 26 | 8 | 3 | 43 | 3 | |
| 2015-06-05 | < | 10 | Torr | 23 | 22 | 10 | 3 | 52 | 5 | |
| 2015-06-12 | < | 8 | Torr | 27 | 21 | 9 | 3 | 63 | 6 | |
| 2015-06-18 | < | 6 | Torr | 25 | 23 | 9 | 2 | 58 | 6 | |
| 2015-06-26 | 1 | 6 | Torr | 15 | 22 | 10 | 4 | 59 | 8 | |
| 2015-07-02 | 1 | 6 | Torr | 22 | 22 | 9 | 3 | 69 | 8 | |
| 2015-07-09 | < | 5 | Torr | 22 | 25 | 7 | 2 | 53 | 10 | |
| 2015-07-17 | < | 5 | Torr | 25 | 21 | 8 | 2 | 54 | 8 | |
| 2015-07-23 | 1 | 4 | Torr | 26 | 21 | 9 | 4 | 54 | 9 | |
| 2015-07-31 | 1 | 6 | Torr | 24 | 23 | 7 | 2 | 53 | 8 | |
| 2015-08-10 | < | 4 | Torr | 23 | 23 | 7 | 2 | 66 | 10 | |
| 2015-08-17 | < | 4 | Torr | 23 | 19 | 6 | 2 | 70 | 8 | |
| 2015-08-24 | < | 5 | Torr | 23 | 23 | 7 | 1 | 69 | 9 | |
| 2015-09-02 | < | 2 | Torr | 21 | 21 | 6 | 2 | 58 | 9 | |
| 2015-09-07 | < | 2 | 85 | 22 | 23 | 6 | 2 | 48 | 7 | |
| 2015-09-15 | < | 6 | Torr | 13 | 23 | 6 | 2 | 61 | 11 | |
| 2015-09-21 | < | 5 | Torr | 14 | 24 | 2 | 2 | 43 | 8 | |
| 2015-09-28 | 1 | 5 | Torr | 25 | 21 | 1 | 1 | 41 | 7 | |
| 2015-10-05 | < | 6 | Torr | 24 | 23 | 2 | 1 | 33 | 4 | |
| 2015-10-13 | < | 5 | Torr | 24 | 25 | 2 | 2 | 33 | 6 | |
| 2015-10-20 | < | 5 | Torr | 21 | 32 | 2 | 2 | 29 | 5 | |
| 2015-10-27 | < | 3 | Torr | 23 | 24 | 2 | 2 | 21 | 4 | |
| 2015-11-02 | < | 2 | Torr | 17 | 23 | 2 | 2 | 27 | 10 | |
| 2015-11-06 | 1 | 1 | Torr | 25 | 26 | 2 | 2 | 25 | 9 | |
| 2015-11-13 | 1 | 2 | Torr | 21 | 38 | 2 | 2 | 46 | 7 | |
| 2015-11-20 | < | 11 | < | 14 | 31 | 2 | 2 | 8 | 5 | |
| 2015-11-27 | < | 14 | < | 23 | 35 | 3 | 2 | < | 3 | |
| 2015-12-04 | < | 16 | < | 22 | 38 | 3 | 2 | < | 2 | |

Droppmängder för förändringsberäkning

| Kilometertal | | 7+453 | 7+490 | 7+618 | 8+062 | 8+173 | 8+372 | 10+440 | 10+831 |
|---------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Relativ tidp. | | | | | | | | | |
| Före (d/m) | | 250 | 31 | 46 | 124 | < | Torr | 30 | 16 |
| Efter 1 (d/m) | | < | 42 | Torr | 9 | < | Torr | 38 | 8 |
| Efter 2 (d/m) | | < | 21 | 0 | 24 | < | < | 31 | 0 |
| Efter 3 (d/m) | | < | 23 | 0 | 32 | < | < | 35 | 0 |

Appendix B: Grundvattennivåer

| Datum | 5D283 | 13CW201U | 13CW201O | 13CW212U | 13CW212O |
|------------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 2014-09-01 | - | 2,85 | 3,72 | 0,71 | 4,59 |
| 2014-09-11 | 1,21 | 2,54 | 3,73 | 0,67 | - |
| 2014-10-02 | - | 3,13 | 3,72 | 0,89 | 4,75 |
| 2014-10-21 | 1,66 | 3,51 | 3,73 | 1,3 | - |
| 2014-11-17 | 1,58 | 3,15 | 3,72 | 1,22 | - |
| 2014-12-18 | - | 3,3 | 3,72 | 1,45 | 4,98 |
| 2015-01-08 | - | 2,99 | 3,65 | 1,31 | 4,86 |
| 2015-03-03 | - | 3,49 | 3,74 | 1,56 | 5,02 |
| 2015-03-27 | - | 3,13 | 3,725 | 1,27 | 4,945 |
| 2015-04-02 | 2,057 | 3,705 | - | 1,655 | - |
| 2015-04-09 | 1,957 | 3,375 | 3,725 | 1,435 | 4,97 |
| 2015-04-16 | 1,812 | 3,12 | 3,72 | 1,345 | 4,91 |
| 2015-04-23 | 1,702 | 2,955 | 3,73 | 1,265 | 4,895 |
| 2015-04-30 | 1,612 | 2,755 | 3,72 | 1,165 | 4,825 |
| 2015-05-07 | 1,557 | 2,77 | 3,72 | 1,12 | 4,85 |
| 2015-05-13 | 1,612 | 2,97 | 3,72 | 1,14 | 4,845 |
| 2015-05-22 | 1,892 | 3,575 | 3,73 | 1,415 | 5 |
| 2015-05-29 | 1,782 | 3,26 | 3,725 | 1,295 | 4,885 |
| 2015-06-05 | 1,732 | 2,6 | 3,725 | 1,265 | 4,895 |
| 2015-06-12 | 1,612 | 2,98 | 3,72 | 1,16 | 4,77 |
| 2015-06-18 | 1,522 | 2,885 | 3,725 | 1,115 | 4,7 |
| 2015-06-26 | 1,537 | 3,005 | 3,725 | 1,11 | 4,74 |
| 2015-07-02 | 1,977 | 2,78 | 3,725 | 1,015 | 4,635 |
| 2015-07-09 | 1,532 | 2,865 | 3,665 | 0,985 | 4,59 |
| 2015-07-17 | 1,497 | 3,005 | 3,665 | 1,08 | 4,73 |
| 2015-07-23 | 1,487 | 2,89 | 3,665 | 1,035 | 4,715 |
| 2015-07-31 | 1,492 | 2,95 | 3,66 | 1,08 | 4,74 |
| 2015-08-10 | 1,382 | 2,66 | 3,68 | 0,94 | 4,625 |
| 2015-08-17 | 1,327 | 2,485 | 3,68 | 0,835 | 4,525 |
| 2015-08-24 | 1,212 | 2,345 | 3,66 | 0,71 | 4,46 |
| 2015-09-02 | 1,022 | 2,43 | 3,68 | 0,7 | 4,495 |
| 2015-09-07 | 1,292 | 3,5 | 4 | 1,215 | 4,995 |
| 2015-09-15 | 1,412 | 3,01 | 3,73 | 0,98 | 4,775 |
| 2015-09-21 | 1,422 | 2,97 | 3,72 | 0,97 | 4,825 |
| 2015-09-28 | 1,442 | 2,955 | 3,7 | 1,04 | 4,85 |
| 2015-10-05 | 1,372 | 2,66 | 3,7 | 0,95 | 4,77 |
| 2015-10-13 | 1,272 | 2,405 | 3,69 | 0,78 | 4,65 |
| 2015-10-20 | 1,197 | 2,22 | 3,69 | 0,69 | 4,665 |
| 2015-10-27 | 1,152 | 2,12 | 3,685 | 0,69 | 4,645 |
| 2015-11-02 | 1,112 | 2,015 | 3,685 | 0,64 | 4,61 |
| 2015-11-06 | 1,087 | 1,935 | 3,68 | 0,67 | 4,63 |
| 2015-11-13 | 1,202 | 2,49 | 3,68 | 0,9 | 4,85 |
| 2015-11-20 | 1,352 | 2,845 | - | 1,21 | 4,96 |
| 2015-11-27 | 1,407 | 2,81 | 3,68 | 1,13 | 5 |
| 2015-12-04 | 1,532 | 3,22 | 3,68 | 1,39 | 5 |

Egenmätta nivåer

| Namn | Marknivå | Referensnivå | Magasin |
|----------|----------|--------------|---------|
| 13CW201O | 5,82 | 6,68 | Övre |
| 13CW201U | 5,85 | 6,45 | Undre |
| 13CW212O | 1,96 | 2,96 | Övre |
| 13CW212U | 2,03 | 2,93 | Undre |
| 5D283 | 3,909 | 5,562 | Undre |

Höjdsystem: RH00

Appendix C: Bergkvalitet

| Kilomtertal | RMR | IRS | RQD | Sprickavstånd | Sprickegenskaper | Grundvattenflöde | Justeringsvärde |
|-------------|-----|-----|-----|---------------|------------------|------------------|-----------------|
| 7+092 | 54 | 15 | 13 | 10 | 22 | 4 | -10 |
| 7+353 | 59 | 15 | 13 | 10 | 22 | 4 | -5 |
| 7+453 | 61 | 15 | 13 | 10 | 21 | 4 | -2 |
| 7+490 | 61 | 15 | 13 | 10 | 21 | 4 | -2 |
| 7+503 | 66 | 15 | 15 | 12,5 | 21,5 | 4 | -2 |
| 7+536 | 71 | 15 | 17 | 15 | 22 | 4 | -2 |
| 7+594 | 60 | 15 | 13 | 10 | 20 | 4 | -2 |
| 7+618 | 46 | 15 | 13 | 8 | 18 | 4 | -12 |
| 7+797 | 52 | 15 | 13 | 10 | 22 | 4 | -12 |
| 8+062 | 54 | 15 | 8 | 8 | 24 | 4 | -5 |
| 8+173 | 60 | 15 | 13 | 10 | 20 | 4 | -2 |
| 8+282 | 69 | 15 | 17 | 10 | 28 | 4 | -5 |
| 8+372 | 75 | 15 | 17 | 15 | 24 | 4 | 0 |
| 10+408 | 55 | 15 | 8 | 8 | 22 | 4 | -2 |
| 10+440 | 51 | 15 | 13 | 10 | 19 | 4 | -10 |
| 10+810 | 54 | 15 | 13 | 8 | 24 | 4 | -10 |
| 10+816 | 78 | 15 | 20 | 15 | 24 | 4 | 0 |
| 10+831 | 71 | 15 | 20 | 15 | 22 | 4 | -5 |
| 10+838 | 71 | 15 | 20 | 15 | 22 | 4 | -5 |

Svaghetszoner

| | | | | | | | |
|--------|----|---|---|---|---|---|-----|
| 7+092 | 8 | 1 | 3 | 5 | 5 | 4 | -10 |
| 7+594 | 18 | 1 | 3 | 5 | 7 | 4 | -2 |
| 7+618 | 4 | 1 | 3 | 5 | 3 | 4 | -12 |
| 8+062 | 18 | 1 | 3 | 8 | 7 | 4 | -5 |
| 10+408 | 21 | 1 | 8 | 5 | 5 | 4 | -2 |

Ytkarteringar

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|---|-----|
| K1 | 50 | 12 | 17 | 15 | 7 | 4 | -5 |
| K1 | 58 | 12 | 17 | 15 | 15 | 4 | -5 |
| K2 | 77 | 15 | 20 | 15 | 28 | 4 | -5 |
| K2 | 48 | 12 | 13 | 8 | 16 | 4 | -5 |
| K3 | 56 | 15 | 17 | 15 | 17 | 4 | -12 |

| Kilomtertal | Q | RQD | Jn | Jr | Ja | Jw | SRF |
|-------------|-------|-----|------|-----|------|------|-----|
| 7+092 | 1,33 | 50 | 15 | 1,5 | 0,75 | 1 | 5 |
| 7+353 | 7 | 70 | 15 | 1,5 | 1 | 1 | 1 |
| 7+453 | 4,62 | 70 | 15 | 1,5 | 1 | 0,66 | 1 |
| 7+490 | 4,62 | 70 | 15 | 1,5 | 1 | 0,66 | 1 |
| 7+503 | 6,92 | 75 | 13,5 | 1,5 | 1 | 0,83 | 1 |
| 7+536 | 10 | 80 | 12 | 1,5 | 1 | 1 | 1 |
| 7+594 | 0,77 | 70 | 12 | 1,5 | 0,75 | 0,66 | 10 |
| 7+618 | 0,099 | 60 | 15 | 1,5 | 4 | 0,66 | 10 |
| 7+797 | 4,62 | 70 | 15 | 1,5 | 1 | 0,66 | 1 |
| 8+062 | 11,9 | 40 | 9 | 2 | 0,75 | 1 | 1 |
| 8+173 | 17,5 | 70 | 6 | 1,5 | 1 | 1 | 1 |
| 8+282 | 80 | 80 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 8+372 | 17,8 | 80 | 9 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 10+408 | 0,6 | 30 | 15 | 1,5 | 1 | 1 | 5 |
| 10+440 | 6 | 60 | 15 | 1,5 | 1 | 1 | 1 |
| 10+810 | 10 | 60 | 12 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 10+816 | 30 | 90 | 6 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 10+831 | 15 | 90 | 9 | 1,5 | 1 | 1 | 1 |
| 10+838 | 15 | 90 | 9 | 1,5 | 1 | 1 | 1 |

Svaghetszoner

| | | | | | | | |
|--------|-------|----|----|-----|---|------|----|
| 7+092 | 0,04 | 20 | 20 | 1,5 | 8 | 1 | 5 |
| 7+594 | 0,099 | 10 | 20 | 3 | 1 | 0,66 | 10 |
| 7+618 | 0,050 | 10 | 20 | 1,5 | 1 | 0,66 | 10 |
| 8+062 | 0,038 | 20 | 20 | 1,5 | 8 | 1 | 5 |
| 10+408 | 0,056 | 30 | 20 | 1,5 | 8 | 1 | 5 |

Ytkarteringar

| | | | | | | | |
|----|-------|----|---|-----|---|------|---|
| K1 | 1,33 | 80 | 9 | 3 | 4 | 1 | 5 |
| K1 | 0,89 | 80 | 9 | 2 | 4 | 1 | 5 |
| K2 | 44,55 | 90 | 4 | 3 | 1 | 0,66 | 1 |
| K2 | 1,65 | 60 | 9 | 1,5 | 4 | 0,66 | 1 |
| K3 | 2,93 | 80 | 9 | 2 | 4 | 0,66 | 1 |

Appendix D: Injekttering

| Kilometertal | 7+453 | 7+490 | 7+536 | 7+618 | 7+797 | 8+062 | 8+173 | 8+372 | 10+440 | 10+831 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Borrning | | | | | | | | | | |
| Håldiameter (mm) | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Hållängd (m) | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2,5 | 2,7 | 3 | 2,5 | 2,7 |
| Vattenförlustmätning | | | | | | | | | | |
| Mättryck (bar) | 2,7 | 3,85 | 3,5 | 3,5 | 2,8 | 3,05 | 3,5 | 2,5 | 3,4 | 4 |
| Mättid (s) | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Volym för mättid (ml) | 23786 | 41 | 170 | 442 | 8265 | 6920 | 0 | 10220 | 1403 | 255 |
| Manschett in i hål (m) | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,5 |
| Grundvattentryck (bar) | 0,05 | 0,9 | 0,5 | 0,44 | 0,5 | 0,36 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| Injekttering | | | | | | | | | | |
| Manschett in i hål (m) | 0,5 | 0,5 | - | 0,5 | - | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Injektteringstryck (bar) | | | | | | | | | | |
| <i>Början</i> | 5 | 40 | - | 40 | - | 20 | 40 | 10 | 40 | 40 |
| <i>Slut</i> | 90 | 100 | - | - | - | 150 | 120 | 100 | 100 | 150 |
| Injektteringstid (min) | 34,30 | 2 | - | 48 | - | 29,30 | 2 | 22 | 3 | 29,45 |
| Injekterad volym (l) | 70 | 8 | - | 60 | - | 45 | 4 | 28 | 9 | 44 |
| Tillsatt accelerator (%) | 4 | - | - | - | - | 2 | - | 2 | - | 3 |
| Tillsattstid för accelerator (min) | 10 | - | - | - | - | 22 | - | 15 | - | 23,50 |
| Tillämpat stoppkriterie | Tryck | Tryck | - | Utfall av sprutbetong. | - | Tryck | Tryck | Tryck | Tryck | Tryck |