© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tillämpning av MWD vid utformning av injektering

”Application of MWD for injectiongrouting design”

Lars Martinsson, SWECO
Fredrik Bengtsson, SWECO

Sammanfattning

På Norra länkens bergentreprenader inom delområde 3 sker kontinuerlig förinjektering där samtliga injekteringshål i trafiktunnlar loggas med MWD. Avsikten med MWD loggning vid injekteringsborrning är att prognostisera bergförhållandena framför stuff och Beställaren utvärderar löpande av Entreprenören tillhandahållen MWD-data.

Arbetsgången vid injektering med tillämpning av MWD är att Entreprenören utformar en borrplan utifrån gällande injekteringsklass i enlighet med bygghandling. Vid borrning av injekteringsskärmar borras vartannat hål i en första omgång varpå MWD-data skickas till Beställaren för utvärdering. MWD-data analyseras av Beställaren samtidigt som borroperatören fortsätter att borra resterande injekteringshål. Utifrån utvärderingen av MWD-data avropar Beställaren om och var ytterligare injekteringshål ska komplettera originalskärmen. Avropet sker i god tid innan operatören borrat klart injekteringshålen i den andra omgången.

Anförandet redovisar hantering av MWD-data och utvärderingsprocessen av beställaren med programvaran GPM 2/GPM+. Resultat från genomförda injekteringar redovisas samt potentialen för vidare tillämpning med MWD loggning vid tunneldrivning.

Summary

Currently at the Norra Länken project, continuous pregrouting is carried out for all traffic tunnels and MWD-data from all grouting holes is registered. The purpose of MWD-data registration during the drilling of the grouting holes is to make prognoses of the rock conditions ahead of the tunnel face, and continuous evaluation of MWD-data is carried out by the Client.

The sequence of work for the pregrouting application with MWD is that the Contractor draws up a drilling plan according to the prevailing grouting class. The contractor drills every other drill hole according to the drill plan, whereafter MWD-data from these holes is sent to the Client for evaluation. MWD-data is analyzed by the Client at the same time as the Contractor continues to drill the remaining holes according to the drill plan. On basis of the evaluation the Client decides if and where

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

additional grout holes shall be drilled in excess of the original drill plan. The work order is sent to the Contractor long before the operator has completed drilling the second half of the grout holes.

This presentation shows the current handling of MWD-data and the evaluation process of the Client with the software GPM 2/GPM+. The results from implemented pregrouting works are shown as well as the potential for further applications with MWD-registration in tunnel works.

Inledning

Samtliga tunnlar och bergrum på Norra länken ska tätas med injektering. Inläckagekravet är satt till 10 liter per sekund för anläggningen som helhet, vilket kan översättas till ett medelvärde på 3 liter per minut och 100 meter. Syftet är att erhålla en god tunnelmiljö, en beständig konstruktion samt att förhindra grundvattensänkning. Tätningen sker huvudsakligen som systematisk förinjektering med cement.

Injektering utgör generellt en stor del av tidsåtgången och därav en stor del av kostnaderna för ett bergtunnelprojekt. Den konventionella injekteringsmetoden där kontrollhål med vattenförlustmätningar sker i flera injekteringsomgångar ger många gånger ett gott resultat. Dock är metoden dyr och svår att kalkylera. Ett injekteringsförfarande med MWD infördes på Norra Länken projektet för att undgå dessa problem där istället hålsättningarna anpassas efter de rådande geologiska förhållandena vid injekteringsborrningen. Fördelen med detta är att borrning med efterföljande injektering utförs vid en etablering vilket minskar tidsåtgången. MWD vid injekteringsborrning har endast används vid bergentreprenaderna inom Norra Länkens delområde 3 vilket sträcker sig från Bellevueberget i väster mot Värtahamnen i öster samt till Frescati i norr. Merparten av Norra Länkens bergschakt är belägen inom delområde 3.

Injektering med MWD

Injekteringsborrning med MWD utförs generellt med hålländen 25 m och med sticken 4 respektive 5 meter. Justeringar sker naturligtvis med hänsyn till låg bergtäckning och närhet till intilliggande anläggningar. Hålspetsavstånden varierar mellan 3 skilda injekteringsklasser. Injekteringsklasserna är styrda utefter områdenas känslighet för grundvattensänkningar och prognostiserad geologi i olika tunnelsträckningar. Överlappen mellan skärmarna skall vara minst 7 m. Beställarens avsikt är att injekteringsborrning för trafiktunnlar och större sidoutrymmen ska utföras med MWD men om Entreprenörerna inte klarar av att leverera MWD-data finns det ett alternativ utan MWD. I det fallet kortas hållängden till 17 meter och hålspetsavståndet minskas.

Programvara för MWD analys finns idag hos flera olika leverantörer. Som leverantör av programvara för MWD tolkningen på Norra länken valdes Rockma. Vid införandet av injektering med MWD användes programvaran GPM 2 men det har senare under projektet ersatts av den vidareutvecklade programvaran GPM +.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Projektets krav är att samtliga borriggar som används till borrning av trafiktunnlar ska vara utrustade med datagivare med tillhörande insamlingsenhet för MWD-data. För utrymningsvägar och mindre sidoutrymmen finns det inga krav på att borriggarna ska vara utrustade med MWD teknik. Det har inte förekommit någon MWD loggning av utrymningsvägar och mindre sidoutrymmen under genomförandet av projektet.

Borriggar av modellen Atlas Copco Boomer XE 3 alternativt WE 3 har inom projektet använts för borrning av samtliga injekteringsskärmar med MWD. Riggarna är utrustade med RCS (Rigg Control System) och ABC (Advanced Boom Control). Systemen är en förutsättning för att insamla MWD-data från borriggarna. Borriggar med MWD loggning är inte unika för Atlas Copco utan det finns även motsvarande system hos andra leverantörer.

De parametrar som registreras av borriggarna är:

- Matningstryck
- Slagverkstryck
- Rotationstryck
- Rotationshastighet
- Spolvattentryck
- Spolvattenflöde
- Tid
- Längd
- Borrsjunkningshastighet

Innan det går att tolka de levererade MWD filerna måste kalibrering genomföras på alla borriggar som är planerade att användas vid drivning av trafiktunnlarna. För att ge ett underlag för kalibrering har 6-8 stycken injekteringsskärmar borrats för respektive borrigg. Programvaruleverantören har deltagit under kalibreringen vid injekteringsborrningarna för att övervaka borriggarnas funktion, samt kalibrerat borrparametrarna mot bergets hårdhet och rådande geologi.

Vattenförlustmätningar har genomförts i 3 m intervaller för ett 10 tal hål av några av de första skärmarna vid respektive entreprenad. Vattenförlustmätningarna har varit ett sätt att kalibrera mjukvaran mot hårvaran. I början av projektet användes vattenförlustmätningarna från de första skärmarna till att jämföra tolkad geologi från programvara med injekteringsprotokollen. Denna jämförelse verkade som en grund när den första tolkningsklassen togs i bruk för programvarans tolkningsautomatik. Tolkningsautomatiken är ett hjälpmedel för att bedöma var kompletterande injekteringshål ska borras.

Borriggen ska vara navigerad vid injekteringsborrning vilket medför att läget för ovanstående parametrar registreras i rymden. Injekteringshålets riktning registreras efter några meters borrning i korrelation med bommens position. Osäkerheter med borrhålsavvikelser förekommer naturligt vid injekteringsborrning vilket är något som

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors
utvärderaren ska beakta. Borriggarna lagrar parametrarna med ett insamlingsintervall som har ställts till 2 cm. Ovanstående parametrarna vägs sedan samman till en tolkning av bergmassan via programvaran GPM 2/GPM+. Programvaran genereras sedan en tolkning utifrån bergets egenskaper i tre olika parametrar.

Parametrar som genereras av GPM 2/GPM+:

- Hårdhet
- Sprickighet
- Vatten

Parametern hårdhet är kalibrerad som bergets enaxiella tryckhållfasthet i enheten Pascal. Sprickighet och vatten är enhetslösa parametrar som genereras av GPM 2/GPM+. Parametern sprickighet ger utvärderaren en bild över bergets uppsprickning längs borrhålen, men saknar detaljeringsgraden att registrera enskilda sprickor såvida sprickorna inte är mycket kraftiga eller i form av en sprickzon. Vattenparametern ger utvärderaren en bild över vattenförekomsten längs borrhålen. Sprickighet- och vattenparametern genererar via programvaran numeriska värden över tolkad magnitud.

Beslutsprocess och utvärdering av MWD-data

Entreprenören upprättar en borrplan för injekteringshålen utefter de styrande måtten som är definierade utifrån gällande injekteringsklass. Operatören borrar först samtliga injekteringshål med det yttre sticket i enlighet med borrplanen, dvs. vartannat hål varefter MWD-data från dessa hål förs över från borriggen till ett USB-minne av Entreprenören. Operatören fortsätter därefter att borra resterande injekteringshålen med det inre sticket. På platskontoret överförs MWD-data från USB minnet till en ftp server via ett leveransprogram. Beställaren har via ftp servern tillgång till MWD-data från Entreprenörerna. Entreprenören meddelar muntligen till Beställarens utvärderare att leveransen är genomförd och e-postar samtidigt gällande injekteringsborrplan.

Utvärderaren följer speciella arbetsrutiner vid utvärdering av MWD-data från injektering. Eftersom de olika utvärderarna följer samma arbetsrutiner medför detta en mer enhetlig utvärderingsprocess. Detta minskar risken för individuella skillnader i beslut mellan olika utvärderare. Utvärderaren måste först informera sig om injekteringsskärmen läge, dvs. var ligger skärmen i plan, bergtäckningen och eventuella restriktioner till närliggande objekt samt eventuella direktiv från arbetsberedningar.

Föregående skärms injekteringsresultat och MWD information jämförs för att skapa en bild av hur bergmassan kan tänkas uppträda framför stuff. Föregående skärms MWD-data kan komplettera MWD informationen i den aktuella skärmen. Utvärderaren har möjlighet att jämföra MWD informationen med karteringen på den sträcka som motsvarar den föregående skärmen. Korrelationen mellan kartering och MWD information är svår att tolka eftersom programvaran inte medger detalje-

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

ringsgraden av enskilda sprickor samt att programvaran och karteraren till viss del tolkar skilda geologiska faktorer. Det bör tilläggas att MWD kan påvisa strukturer av storleksklassen kraftiga sprickor och ”sprickzoner” och MWD tolkningen är ett bra hjälpmedel för karterande geologer.

Utvärderaren inhämtar sedan information om inläckagesituationen vid stuff. Detta sker vanligtvis genom samtal med Entreprenören. Det är synliga inläckage från den första halvan av injekteringshålen och som är av intresse för utvärderaren. I programvaran GPM 2/GPM+ studeras de tre olika sammansatta parametrarna hårdhet, sprickighet och vatten. Eventuell korrupt datainformation som väsentligt avviker från närliggande hål samt eventuella avvikelser i borrhålsgeometrier jämfört med översänd borrplan noteras.

Längs injekteringsskärmens läge skapas interpolerade 3-D modeller av de olika parametrarna. Detta ger en mycket bra överblick av de tolkade bergegenskaperna på den aktuella sträckan. Samtliga injekteringshål tolkas enskilt för att överblicka MWD-data på detaljnivå. Det som främst är av intresse är korrelationen mellan sprickighet och vattenförekomst.

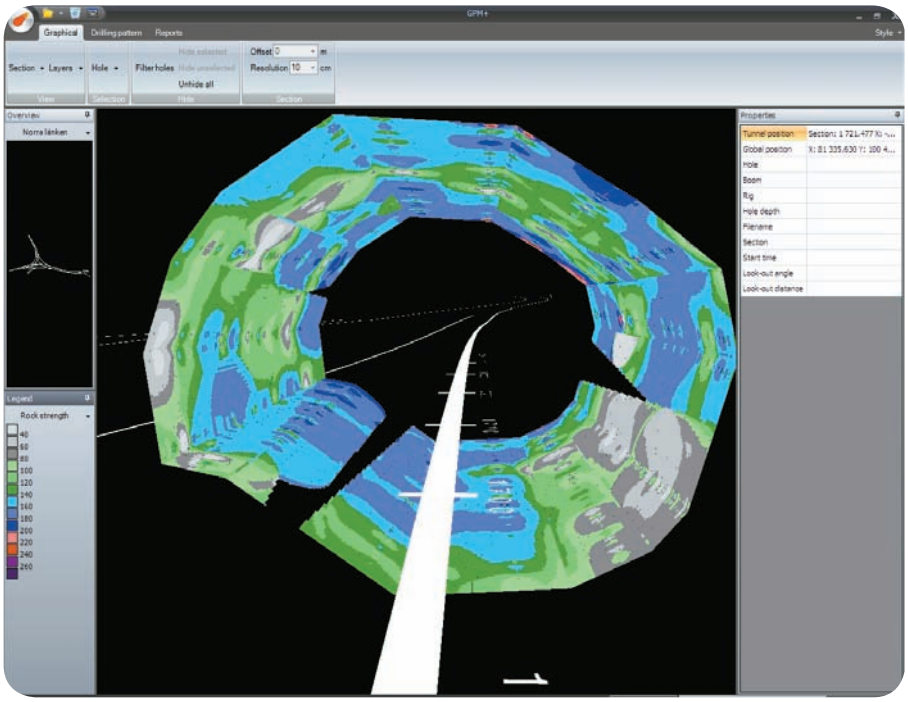

Bild 1. Parametern hårdhet har interpolerats för att ge en tydligare överblick. Exemplet är hämtat från den inre huvudtunneln 301, LM 1/704.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

I bild 2 redovisas de genererade parametrarna i tabellform i det nedre högra hörnet för det gulmarkerade injekteringshålet. Räknat från ovan redovisas den tolkade hårdheten, sprickigheten samt vattenförekomsten längs hela borrhålet. I exemplet ses det en tydlig korrelation mellan mjukt berg, stor sprickförekomst samt vatten vid håldjupet cirka 16,3 m.

Därefter studeras resultatet av programvarans tolkningsautomatik som sammanlänkar samtliga parametrar från MWD tolkningen. Resultatet är att samtliga injekteringshål färgkodas i grön, röd och lila färg. Grön färg betyder att inga kompletteringshål ska borras och röd färg innebär kompletteringshål i närheten av hålet. Lila färgkod påvisar att MWD-data från hålet är korrupt. Färgkodningen är inte styrande för utvärderarens tolkning. Färgkodningen ska ses som ett mycket bra hjälpmedel för utvärderaren och programvarans tolkning behöver inte följas.

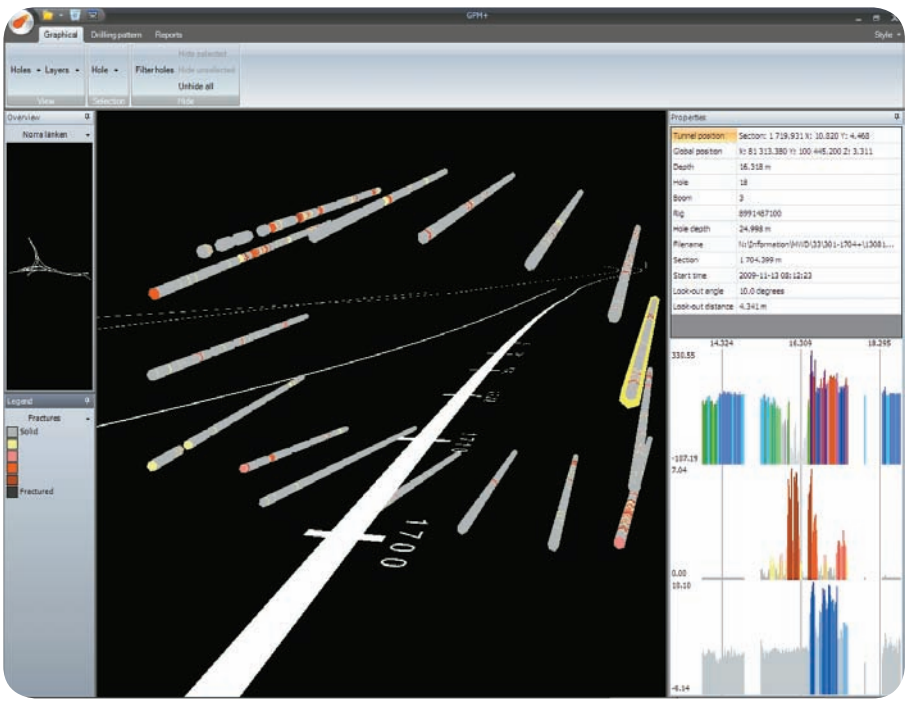

Bild 2. Första hälften av hål i inre huvudtunnel 301, LM 1/704 redovisas med parametern sprickighet.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

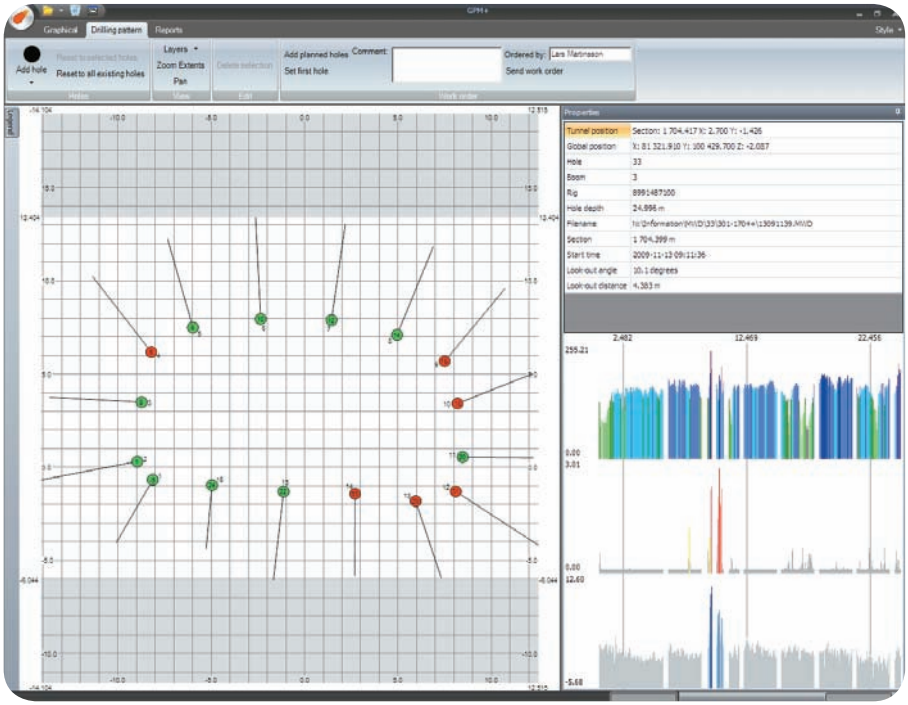

Bild 3. Färgkodningen redovisas i ett format för avrop.

Samtlig information om bergets egenskaper vägs samman och ansättningspunkterna för eventuella kompletterande injekteringshål markeras i programvarans borrplan. Information om hållängd och stick för de kompletterande injekteringshålen noteras i en textruta på borrplanen. När kompletterande injekteringshål avropas e-postas den uppdaterade borrplanen till Entreprenören och i samband med leverans ges ett muntligt besked till arbetsledare. Leverans sker i god tid innan operatören borrat klart den andra halvan. Arbetsledaren vidarebefordrar den uppdaterade borrplanen till borroperatören. Den uppdaterade borrplanen är inte kompatibel med borriggarna vilket medför att operatören borrar de kompletterande injekteringshålen genom att anpassa riktningarna i relation med närliggande hål enligt utvärderarens anvisningar.

Om inga hålkompletteringar ska borras i en aktuell injekteringsskärm informeras Entreprenören via e-post samtidigt som muntligt besked ges till arbetsledaren. I komplicerade fall där utvärderaren bedömer att kompletteringen blir stor kan beslut fattas att injekteringen i stället ska genomföras i flera omgångar från samma stuffläge eller genom tätare överlapp mellan skärmarna. Dessa fall diskuterar alltid utvärderaren med byggledare och beslut fattas av samordnande byggledare som också meddelar entreprenören hur arbetet ska genomföras.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

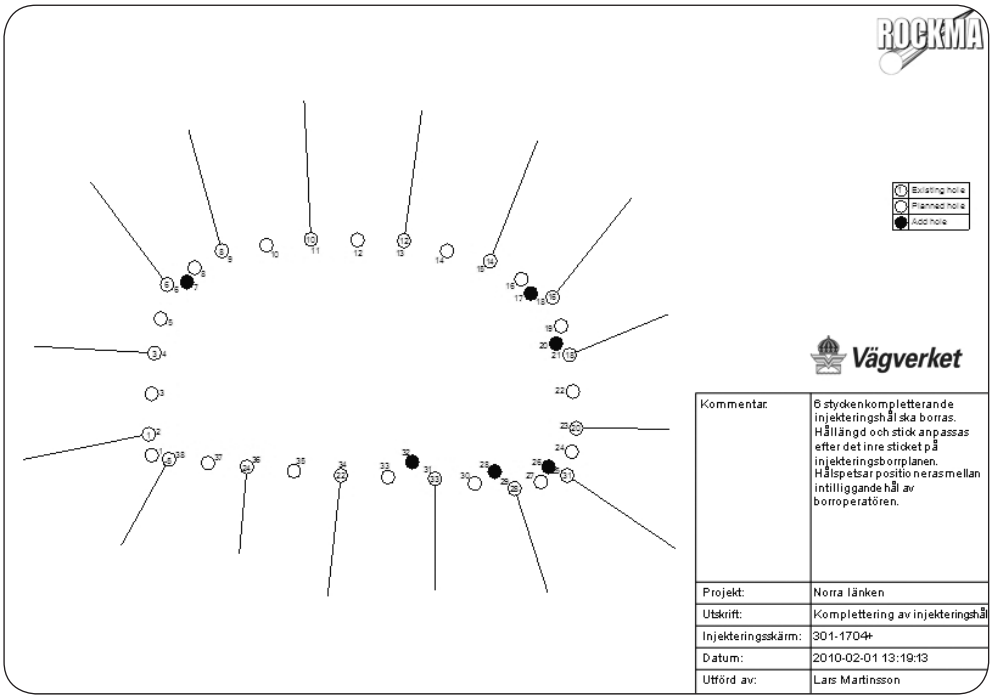

Bild 4. Exempel på avrop till Entreprenören. Borrhål med stick har utvärderats medan vita hål borras i pass 2 i väntan på eventuell komplettering. Svarta hål är kompletteringar.

Resultat och slutsatser

MWD system vid tunneldrivning har en stor utvecklingspotential eftersom MWD-data finns mycket lättillgängligt. På Norra länken har systemet i första hand använts till att optimera insatserna vid förinjektering men informationen kan naturligtvis användas i andra tillämpningar.

Det är svårt att bedöma hur framgångsrikt injekteringsförfarandet med MWD har varit på Norra Länken. Det är i dagsläget mycket svårt att korrelera de uppmätta inläckagen i tunnelsystemet med de genomförda injekteringsinsatserna. För att göra en rättvis bedömning bör produktionen vara klar och tunneln bör ha nått jämnviktsläge med grundvattensakviferen. Det finns möjligheter att göra jämförelser mellan utförd injektering och de uppmätta inläckagen vid produktionsuppehåll. Det finns dock svårigheter att korrelera inläckage med läget för en enskild injekteringsskärm då inläckagen ofta är visuellt diffusa samtidigt som avstånden mellan mätdammarna är stort. En slutgiltig bedömning av injekteringsförfarandet kommer troligen endast att kunna göras i relation till hur inläckagekraven på Norra Länken har uppfyllts som helhet.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Intrimningen av programvara och utvärderare är en löpande process som pågått sedan systemet med MWD infördes på Norra Länken. Kriteriet för vad som anses vara ett framgångrikt kompletterande injekteringshål har bestämts som ett hål som får en större bruksåtgång än medianvärdet för alla hål i en injekteringsskärm. Det finns naturligtvis invändningar mot ovanstående resonemang så som att olika injekteringshål tätar olika stor volym av bergmassan beroende på variation i hålspetsavstånd, att injekteringsordningen spelar roll för bruksåtgången vid förekomst av samband mellan injekteringshål och att injekteringstrycken varierar mellan hål. Därför har resonemanget setts som ett grundkriterium för framgång som sedan har modifierats utifrån utvärderarens erfarenhet. Slutsatsen hitintills är att systemets träffsäkerhet ligger på 60–80 %.

Utvärderarna har sedan införandet av injektering med MWD genomfört fortlöpande justeringar i programvarans tolkningsautomatik och i processen för utvärdering. Justeringarna sker efter analys av resultatet från genomförda injekteringar och undantagsvisa vattenförlustmätningar. Som systemet ser ut idag är intrimning av tolkningsfunktionen en iterativ process som fortlöper under hela genomförandet av ett projekt med MWD och en färdig optimering kommer inte att finnas tillgänglig efter Norra Länken. Erfarenheterna från Norra Länken kommer däremot att påskynda driftsättandet och den initiella intrimningen av systemet vid nya projekt så att helt godtagbara resultat kan uppnås tidigt.

Injektering med MWD är en ny teknik och utvärderaren bör alltid beakta tillförlitligheten i MWD-data översänd från Entreprenör och programvarans tolkning. En borrigg är ett grovt instrument för datainsamling där slitage och eventuella läckage i maskinkomponenter påverkar informationen i rådatafilerna. Olika borroperatörers beteende och justeringar av borriggens inställningar är även faktorer som kan påverka MWD registreringen. Enligt leverantören korrigerar programvaran MWD tolkningen med hänsyn till maskinslitage och olika borroperatörers beteende. Beställaren har i dagsläget ingen insyn i hur denna korrigering genomförs och hur mycket dessa faktorer kan påverka programvarans tolkning av bergets egenskaper.

Bedömningen är att programvarans tolkning är ett bra hjälpmedel för att bedöma bergets egenskaper framför stuff. Utvärderaren skapar sig alltid en egen bild av förutsättningarna för injekteringen på aktuell sträcka genom att inhämta samtlig information från stuff. Utan information om rådande geologi vid stuff kan det vara svårt att förstå programvarans tolkade bergegenskaper. Med hjälp av programvaran skapar sig utvärderaren en bild över om eller var kompletterande injekteringshål ska borras. Tolkningsautomatiken i programvaran anger med färgkodning av borrhålen i vilka områden som kompletterande injektering ska borras i enlighet med programvarans injekteringsklass. Denna information stämmer inte alltid överens med utvärderarens tolkning och utvärderaren tillåts frångå tolkningsautomatiken. Ur produktionsperspektiv är detta ett korrekt arbetssätt men det försvårar jämförelser mellan tolkningsautomatik och injekteringsresultat.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Fördelarna med systemet har blivit fler än vad som avsetts och tekniken har bland annat använts till prognostisering i tekniskt problematiska passager samt vid sonderingsborrning. Vid sondering med MWD finns t.ex. möjligheten att jämföra sonderingsreultatet med den prognostiserade bergmodellen eftersom MWD informationen är orienterad i rymden. En förutsättning för detta är att borriggen är navigerad vid borrning. MWD systemet ger även möjligheter till produktionskontroll på en detaljnivå som hitintills inte varit möjlig för Beställaren. Varje injekteringshål är navigerade i rymden vilket ger möjlighet att kontrollera att injekteringsskärmarna borras i enlighet med styrande injekteringsklass. Tidsåtgången för borrning av varje enskilt borrhål registreras och den totala tidsåtgången för varje enskild skärm kan kalkyleras med programvaran vilket kan vara användbart vid ekonomiska diskussioner med Entreprenörer.

Projektets bedömning är att injektering med MWD har varit en produktionsvänlig och kostnadseffektiv metod för att optimera förinjekteringsinsatserna. Hur resultatet och kostnaderna stått sig i jämförelse med konventionell injektering med kontrollhål och vattenförlustmätning är idag inte möjligt att utvärdera.