

UTBREDNING OCH HYDRAULISKA EGENSKAPER FÖR EN SPRÄNGSKADAD ZON RUNT EN TUNNEL – ERFARENHETER FRÅN ÄSPÖ BERGLABORATORIUM

Extension and Hydraulic Properties of an Excavation- Damaged Zone around a Tunnel - Experiences from the Äspö Hard Rock Laboratory

Lars O. Ericsson, Chalmers tekniska högskola
Rolf Christiansson, Svensk Kärnbränslehantering
Henrik Ittner, Svensk Kärnbränslehantering
Kent Hansson, Geosigma
Christian Butron, Trafikverket
Tomas Lehtimäki, Svensk Kärnbränslehantering
Johan Thörn, Chalmers tekniska högskola
Oskar Sigurdsson, OS Geological Consulting

Sammanfattning

I undermarksbyggandet förekommer olika frågeställningar om utbredning och egenskaper för en sprängskadad zon runt en tunnel, (Excavation Damage Zone, EDZ). I det traditionella tunnelbyggandet behandlas t.ex. stabilitets- och inläckagefrågor medan det för kärnavfallsindustrin framförallt är viktigt att förstå den sprängskadade zonen egenskaper för långsiktig säkerhet. SKB har bedrivit ett omfattande försök om den sprängskadade zonen i en tunnel som byggdes på Äspölaboratoriet 2012. Sprängdesign och kvalitetsstyrningsprogram under tunnelbyggnaden baserades på tidigare erfarenheter från Äspö.

Uppföljningen av den sprängskadade zonen, (EDZ), skedde utmed ett 20 m långt avsnitt av tunneln TAS04 på 410 m nivå. I sammanfattning omfattade arbetena: 1) en fotogrammetrisk inmätning, 2) en geologisk karaktärisering av tunneln och borrhälar från de 42 korta kärnborrhål (1-2 m djupa) som borrades i tunnelgolvet samt 3) geofysisk mätning med högfrekvent markradar (GPR). I respektive borrhål utfördes: 4) injektionstester i fem sektioner, dvs. totalt 210 injektionstester. Samtidigt registrerades tryckresponser i de övriga hålen, vilket gav 205 interferenstester. Efter att hydrotester avslutats så har 5) två grunda schakter sågats fram i tunnelgolvet för sprickkaraktärisering.

Undersökningarna visar att: 1) Spränginducerade sprickor har låg frekvens och relativt flest spränginducerade sprickor finns inom området för bottenladdning i slutet av varje salva. Där uppskattas skadedjupet till ca 0,5 m, medan skadedjupet för resten av salvan inom pipladdningen bedöms vara ca 0,3 m. 2) Den låga magnituden på in-situ bergspänningar kan ha viss påverkan på skadezonen genom en liten hävning av golvet.

3) Omfattning av och konnektivitet för inducerade sprickor kan bara bedömas med indirekta metoder, såsom hydrotester i borrhål eller med en kombination av geologisk och geofysisk dokumentation. 4) De flesta injektionstesterna med transmissivitet $> 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ läckte till tunnelgolvet, troligen via sprickor som inducerats eller påverkats vid tunneluttaget. 5) De högsta transmissiviteterna återfanns ytligt, samt i läge för bottenladdningen. 6) Konnektiviteten mellan inducerade sprickor är begränsad. 7) Den sprängdesign som tillämpats har visat sig ge en mycket begränsad skadeutbredning.

Summary

In underground construction, there are different issues about the extension and properties of a damaged zone around a tunnel due to excavation (the Excavation Damaged Zone, EDZ). In the traditional tunneling, stability and leakage tasks are treated while for the nuclear waste industry it is important to understand the EDZ properties for long-term safety reasons. SKB has conducted extensive investigations of the EDZ in a tunnel that was built in 2012 at the Äspö Hard Rock Laboratory. Blasting design and a quality assurance documents for the excavation was based on previous experiences from the Äspö facility.

Follow-up of the EDZ, took place along a 20 m long section of a tunnel TAS04 at the 410 m level. In summary the project included: 1) a photogrammetric survey, 2) a geological characterization of the tunnel and drill cores from 42 short holes (1-2 m deep) drilled in the tunnel floor and 3) geophysical measurements with high frequency ground penetrating radar (GPR). In each borehole were performed 4) injection tests in five sealed-off sections, a total of 210 injection tests. Pressure responses were recorded in parallel in the surrounding holes, which gave 205 interference tests. When the hydrotesting was completed 5) two shallow trenches were sawed up in the tunnel floor for fracture characterization.

The investigation shows that: 1) Blast induced fractures have low frequency and relatively seen the most blast induced fractures occur in areas of the bottom charge at the end of each blasting round. In bottom charge areas the estimated damage depth was about 0.5 m, while the depth of the damage along the column charge areas was estimated to be about 0.3 m. 2) The low magnitudes of the in-situ rock stresses may have some impact on the damage zone, because of a slight heave of the tunnel floor. 3) The occurrence of and the connectivity for induced fractures can only be assessed by indirect methods, such as hydrotests in boreholes or a combination of geological and geophysical documentation. 4) Most injection tests with transmissivities $> 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ leaked to the tunnel floor, probably through fractures which were induced or influenced by the excavation. 5) The highest transmissivities were found superficially, as well as in the areas of bottom charge. 6) The connectivity between blast induced fractures was found to be limited. 7) It was demonstrated that the blast design applied in this project caused a very limited damage to the tunnel perimeter.

1 Introduktion och syfte

I konventionell tunneldrivning brukar man föreskriva ett maximalt djup på sprängskadezonen (Svensk Byggtjänst, 2014, dvs. Anläggnings AMA 13). Omfattande sprängskador kan leda till ökande skrotnings, och kanske också förstärkningsbehov. Uttagsmetoden för en tunnel kan påverka de vattenförande egenskaperna i tunnelns omgivning och ha en viss betydelse för hur inläckaget fördelar sig.

När det gäller slutförvaring av radioaktivt avfall har den så kallade skadezonen (Excavation Damaged Zone, EDZ) varit föremål för studier i ca 3 decennier. Även om berget är mycket tätt, och tunnarna i slutförvaret fylls igen med låg-permeabelt material, som kompakterad bentonitlera, så kan en relativt högre genomsläpplighet i en skadezon kunna medföra en viss förhöjd risk för radionuklidtransport till biosfären och detta betraktat över de mycket långa tidsperspektiv som analyseras.

Störningen på berget närmast tunneln beror på en kombination av uttagsmetoden och den bergmekaniska responsen. Generellt kan man säga att en TBM-borrad tunnel är skonsammare mot tunnelkonturen än borrhning – sprängning (se t.ex. Bäckblom, 2008). I jämförelse mellan hårt kristallint berg och mjuka sedimentära bergarter kan dock den hydrauliska konduktiviteten i det mjukare berget förmodligen öka mer pga. större deformation.

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har möjligheten att bedriva tillämpad forskning vid Äspö berglaboratorium, Oskarshamn. I samband med att Äspölaboratoriet år 2012 byggdes ut på 410-m nivån tillämpades en sprängdesign baserad på tidigare erfarenheter med föreskrivna borrh- och laddningsplaner samt med användning av elektroniska tändare (Olsson m fl., 2004, Olson m fl., 2009, Karlzen och Johansson, 2010). Ett program för kvalitetsstyrning följdes för att säkerställa att den föreskrivna sprängdesignen tillämpades så långt som möjligt. Avvikelse i föreskrivna borrhningsprecisioner och laddningsmängder dokumenterades. Utbredningen av skadezonen följdes därefter upp med geologiska och geofysiska studier.

Undersökning av skadezonens hydrauliska egenskaper i en tunnel har stor förutsättning att underskatta konduktiviteten eftersom mätning görs vid huvudsakligen dränerade förhållanden. Kapillära krafter vid delvis omättat tillstånd medför att förutsättningarna för hydrauliska traditionella testmetoder inte är uppfyllda annat än i sulan, antaget att man har kontroll över att sulan inte kan dränera till en lägre nivå. Genom att rensa sulan i en tunnel vid Äspö utbyggnad och hålla konstanta vattenytor i lågpunkter kunde en undersökning av skadezonens hydrauliska egenskaper vid vattenmättnad göras över en 20 m lång sträcka.

Den ovan beskrivna undersökningsomfattningen har som övergripande mål således varit inriktad på att beskriva en skadezonens utbredning i en tunnelsula samt dess genomsläpplighetsegenskaper och med speciell tonvikt vid den hydrauliska

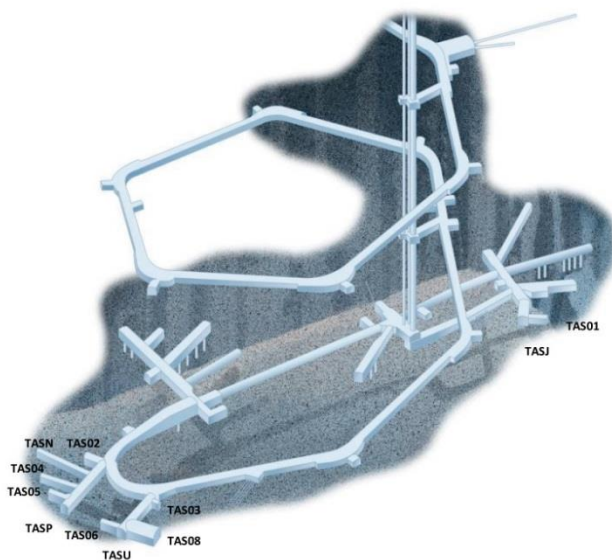
konnektiviteten utmed sulan. Metodbeskrivningar, analysomfattning och resultat har sammanställts i en SKB-rapport, Ericsson et al., (2015).

Syftet med denna artikel är att utifrån de geologiska, geofysiska och hydrogeologiska resultaten som erhållits från ovanstående projekt, och då kopplade till en modern sprängdesign, diskutera skadezonens utbredning och konsekvensen för konventionell tunneldrivning.

2 Undersökt tunnel

Den undersökta tunneln (TAS04) ingår i en grupp av tunnlar som byggdes på Äspölaboratoriets – 410-m nivå, Figur 1. Tunneln har traditionellt hästskeformat tvärsnitt på 20 m². Bredd/höjd-förhållandet är 4,2 m/ 4,8 m, samma mått som planerade deponeringstunnlar i KBS-3 förvaret för använt kärnbränsle. Tunneln omfattade 8 salvor, och total längd är 36 m. Sonderingsborrning utfördes systematiskt, men berget var så torrt att förinjektering inte behövdes.

Tunneln är orienterad parallellt med den största huvudspänningen som är ca 22 MPa på aktuellt djup och orienterad nordväst - sydost. Minsta horisontalspänning är ca 12 MPa, dvs. ungefär lika stor som vertikalspänningen. Bergmekanisk analys i en enkel elastisk modell indikerar en deformation (konvergens) i väggar och golv på mindre än 1 mm. Det kan i praktiken innebära att enstaka sprickor sub-parallellt med väggar eller sula kan ha öppnats något eller skjuvats.

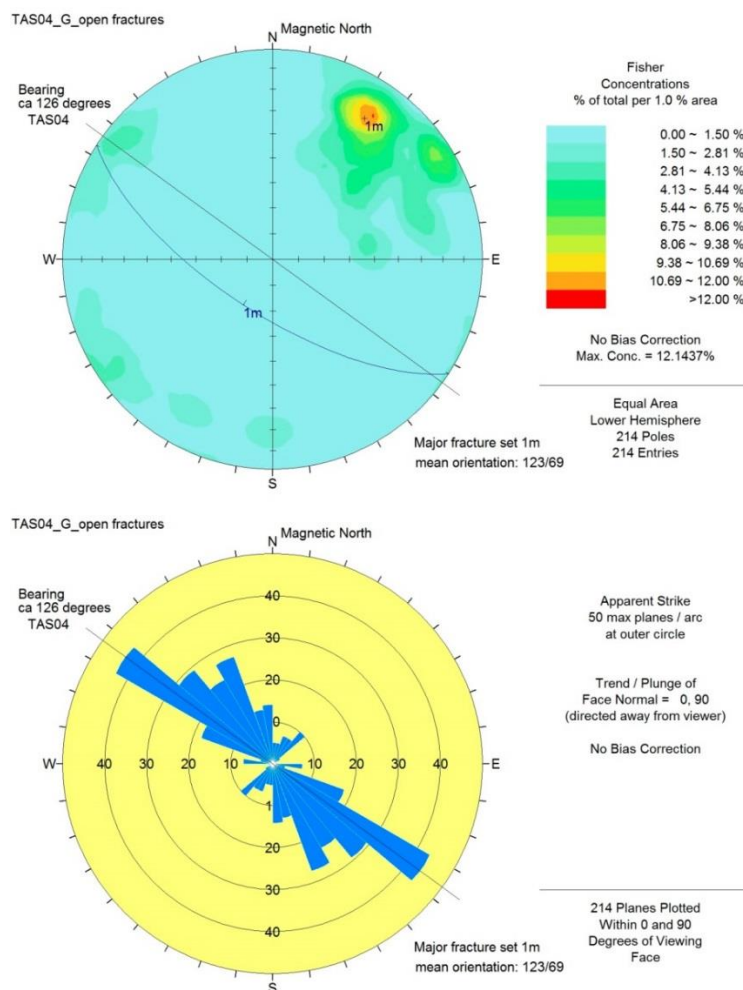


Figur 1. Översikt av Äspö Hard Rock Laboratory. Nya tunnlar 2012 är markerade med namn. TAS04 är längst ner till vänster i bild.

Overview of the Äspö HRL. Labelled tunnels are constructed 2012. TAS04 is located in the lower left corner of the figure.

Berggrunden domineras av en finkornig granit i yttre halvan av tunneln. Längre in dominerar diorit. Sprickigheten i sulan domineras av ett brantstående sprickset som stryker nordväst – sydöst, dvs. parallellt med tunneln och största horisontalspänningen. Även ett brantstående nordost – sydväst sprickset förekommer, liksom flacka sprickor som dock har mycket låg frekvens i TAS04 (Figur 2). Sprickigheten i den finkorniga graniten var mycket hög närmast tunnelmynningen. Därför beslutades att göra uppföljning av sprängskadezonens hydrauliska egenskaper på de innersta 5 salvorna, dvs. totalt 20 m tunnel.

Det totala inläckaget till den undersökta sträckan kunde bestämmas med hög tillförlitlighet genom att ha nivåkontroll (pumpning) på vattenytor i sulans lågpunkter. Det totala inläckaget till undersökningsområdet var 0,8 l/min.



Figur 2. Karterade sprickor i sulan av TAS04. Tunnelorienteringen med bäring 126° är markerad.

Mapped fractures in the floor of the tunnel TAS04. The tunnel orientation 126° is also shown.

SKB har positiva erfarenheter att tillämpa modern detonikforskning med syfte att minimera sprängskadezonen (Olsson och Ouchterlony, 2003), vilket tillämpades även i projektets bergarbeten. Sprängdesignen hade som mål en specifik laddning på $2,7 \text{ kg/m}^3$ och en borrhning på $4,0 \text{ m/m}^3$. Dessa värden trimmades ner något i produktion. Laddning gjordes med strängemulsion, $0,35 \text{ kg/m}$ i kontur och $0,5 \text{ kg/m}$ i sula och hjälpare. Ett kontrollprogram kunde bekräfta att dessa krav följdes för nästan alla kontur- och sulhål (Ericsson m fl., 2015). Initiering gjordes med elektroniska sprängkapslar.

Inför detaljundersökningar av skadezonen i sulan grovrensades berget först. Därefter spolades berget rent samtidigt som material som spolades loss sögs upp med slambil. Ingen mekanisk rensning av sulan gjordes, dvs. bergrensningen var extremt skonsam och lämnade ett helt rent golv.

3 Undersökningar

Uppföljningen av den sprängskadade zonen, (EDZ), skedde utmed ett 20 m långt avsnitt av tunneln TAS04. I sammanfattning omfattade arbetena: 1) en fotogrammetrisk inmätning av tunneln, 2) en geologisk karaktärisering genom kartering av tunneln och borrhälar från de 42 korta kärnborrhål (1-2 m djupa) som borrades i tunnelgolvet samt 3) geofysisk mätning med högfrekvent markradar (GPR) i profiler längs tunneln (profilavstånd 10 cm). I respektive borrhål utfördes: 4) injektionstester i fem sektioner, dvs. totalt 210 injektionstester. Samtidigt registrerades tryckresponser i de övriga hålen, vilket gav 205 interferenstester. Efter att hydrotester avslutats så har 5) två grunda schakter sågats fram i tunnelgolvet för sprickkaraktärisering.

Mättade förhållanden för borrhålstesterna säkerställdes genom att nivåkontrollera vattensamlingar i golvets lågpunkter. I samband med injektionstesterna observerades eventuellt läckage till tunnelgolvet. Inför de hydrogeologiska mätningarna utfördes några hydro-mekaniska injektionstester med deformationsmätning för att säkerställa att injektionstrycket inte orsakade hydraulisk lyftning eller s.k. ”jacking” i tunnelgolvet.

3.1. Geologiska undersökningar

En geologisk karakterisering av försöksområdet har utgjort grunden för att beskriva effekterna av tunneluttaget på EDZ. Speciellt studerades bergarter, sprickor, sprickzoner och vatteninflöden till såväl tunnel som borrhål.

Fotogrammetri användes för att utveckla en 3D-modell av tunneln. Karteringsupplösningen för sprickspår var cirka 1 m på bergytorna. Sprickor som inte visar några tecken på öppning har benämnts ”täta”. Alla andra sprickor har klassificerats som ”täta till delvis öppna”, ”öppna”, ”öppna till delvis täta”, ”åter-öppnade” eller ”inducerade öppna sprickor” (sprickor utan fyllnader och med färsk bergyta). Sprickorna har också karterats med hänsyn till förekomst av tidigare hydrotermal

påveverkan (dvs. rödfärgningar p.g.a. oxidation). Bergarter som förekommer i gångar med en vidd mindre än 0,1 m har betraktats som mineralfyllda sprickor.

Kartläggning av borrhålskärnorna gjordes med avseende på bergarter och sprickor, med en djupbestämning längs kärnan, α -vinkel, sprickvidd samt bredd. Vidare har karterats sprick-relaterade egenskaper som t.ex. form, råhet, omvandlingar och mineralfyllnader. Borrhålen filmades med en borrhåls-kamera som ett komplement till kärnkarteringen. Filmningen gav möjlighet till en översiktlig och grov orientering av stora sprickstrukturer i kärnorna. Vidare så har filmningen använts för att avgöra om sprickorna varit borrhåls-inducerade eller ej.

3.2 Geofysiska undersökningar

Geofysiska undersökningar i TAS04 genomfördes på tunnelgolvet med markradar (Ground Penetrating Radar, GPR). Mätningen gjordes med ett av GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) tillverkat SIR-3000-system och en markkopplad skärmad antenn med centerfrekvens av 1,5 GHz. Vid mätning placeras antennen mot det rengjorda och torkade tunnelgolvet för bästa möjliga kontakt för datainsamling. Registreringen av data sker med hjälp av en kalibrerad sk. linje-omkodare. Antennen styrdes längs mätlinjerna på tunnelgolvet med hjälp av laser-positionering. Mätningarna utfördes utmed linjer parallella med tunneln och med ett inbördes avstånd av 10 cm. Mätpunktsavstånd per linje var 1 cm. Tunneln mättes i två delar vid två olika tidpunkter. Den första delen täckte tunnellängden 7-21 m och genomfördes innan borrhålen för de hydrauliska testerna. Denna första mätning bestod av 41 parallella linjer. Den andra delen, som genomfördes efter borrhålen av undersökningshål, täckte tunnelavsnittet 21 - 36 m (slutet av tunneln) och bestod av 39 parallella linjer. Mätningsskiktet täckte hela bredden av tunneln.

Insamlade GPR-data analyserades på två olika sätt. Först analyserades oprocesserad data enligt en signalbehandlingsmetod som är beskriven i Kantia et al., (2010), där frekvensinnehållet i den reflekterade signalen (respons) analyseras. Därefter processades, och tolkades, data med en mer konventionell metod, dvs. reflektortolkning. Mätningar i flera parallella, nära liggande, mätlinjer möjliggör kartläggning av reflektorer från GPR-bilderna som ytor, vilket innebär att singulära linjereflektorer från flera parallella scanning-linjer kombineras till reflektorplan. Reflektorplanen har sedan visualiserats i 3D.

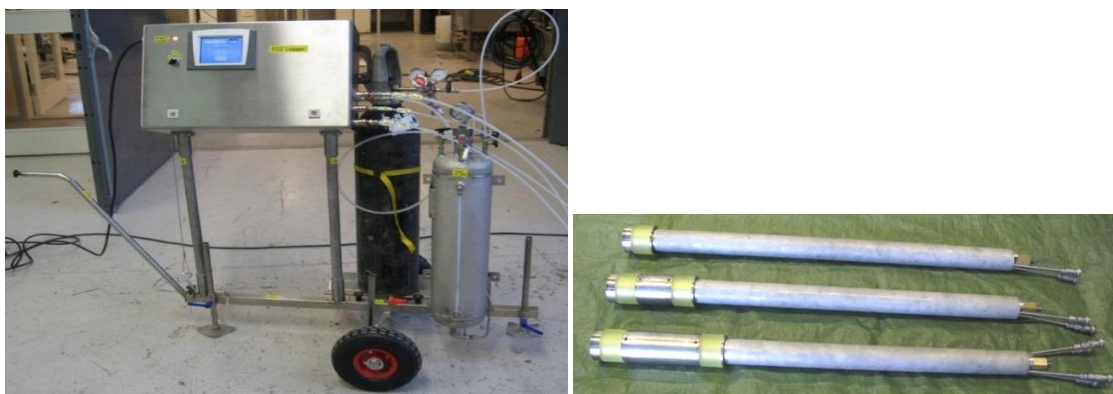
3.3 Hydrotester

En specialdesignad utrustning, se Figur 3, utvecklades för de hydrogeologiska undersökningarna i de 42 borrhålen, 76 mm i diameter, vilka borrhades vertikalt i golvet inom en sträcka av 20 m i TAS04 tunneln. Majoriteten av hålen (35 st.) var 1,0 m djupa och resterande hål (7 st.) var 2,0 m djupa. Borrhålen placerades i rutnät med hålavstånd ca 1 m. Största avstånd var 1,4 m. För att möta injektionstesternas krav utformades mätutrustningen utifrån följande kriterier:

- Utrustningen skall kunna mäta transmissiviteter mellan $5 \cdot 10^{-10}$ - $5 \cdot 10^{-7}$ m²/s vid en tryckstörning av 500 kPa. Flödesintervall som måste detekteras vid det trycket är 1,0 - 1500 ml/min.
- Mätningar längs borrhålen skall kunna göras i direkt anslutning till borrhålets topp, dvs. från tunnelgolvet.
- Manschett-systemet skall ha en gummitätningsslängd av 50 mm.
- En dubbelmanschett-system med 100 mm respektive 200 mm sektionsslängder samt ett enkelmanschett-system skall användas.
- Utrustningen skall kunna visa numeriska värden och producera grafer som åskådliggör valda parametrar mot tid.
- En mätning skall omfatta såväl en injektions- som en återhämtningsfas.

Vid hydrotesterna bultades en borrhålsförlängare fast mot tunnelgolvet för att möjliggöra testning direkt från golvytan i borrhålen. Övervakning utfördes av eventuell påverkan från ett injektionstest i övriga omkringliggande borrhål (med Hydro Monitoring System HMS vid Äspölaboratoriet). Injektionstesterna utfördes vid 5 olika djupintervall i alla 42 borrhålen, vilket alltså innebar totalt 210 injektionstester.

Det grundvatten som flödade mot tunneln fyllde upp de lokala fördjupningarna i det ojämna golvet. Små pumpar installerades för att styra vattennivån i dessa lokala vattenansamlingar och säkerställa konstanta tryckrandvillkor och vattenmättade förhållanden under injektionstesterna. Dessa pumpar gjorde det också möjligt att få ett bra mått på det totala inflödet av vatten till testavsnittet i tunneln.

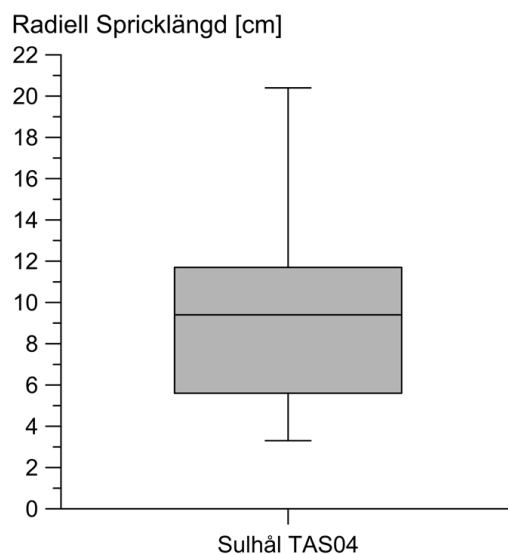
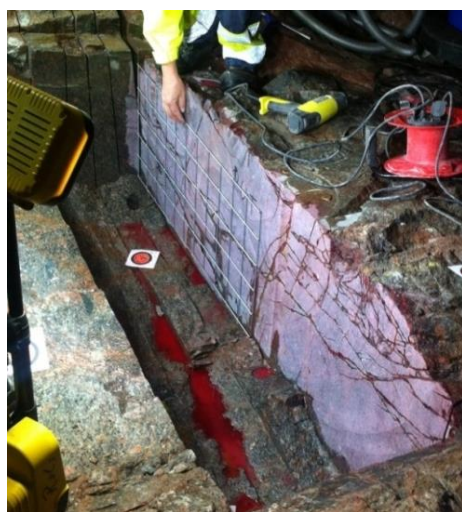


Figur 3. Kontrollenhet, trycktank och gasbehållare monterade på en transportkärra. Manschettssystem för sektionsslängderna 10 och 20 cm samt enkelmanschett.

Control unit, pressure tank and gas vessel mounted on a transport carriage. Packer system for section lengths 10 and 20 cm and for single-hole packer measurements.

3.4 Observationer i sågade snitt

En undersökning av sprängsprickor ifrån konturhål i vägg och sula genomfördes i de nya tunnarna TAS04 och den parallella TASN under 2014 (se Figur 1). Fem slitsar sågades ut och karterades med avseende på sprängsprickor och geologiska sprickor. Karteringsdata korrelerades sedan mot laddningsdata från enskilda kontur- och sulhål. Generellt visar resultaten stor spridning med få sprickor längre än 20 cm (Ittner och Bouvin, 2015). Den längsta sprängsprickan som karterades vid en borrhypa i sulan var 20,4 cm. Figur 4 visar kartering och längdfördelning hos sprängsprickor karterade vid sulhål i TAS04.



Figur 4. Kartering av sprickor och längdfördelning hos sprängsprickor/spränginducerade sprickor karterade vid sulhål i TAS04. Plotten till höger visar minimum-, maximum- och medianvärde samt 25-respektive 75-percentilerna.

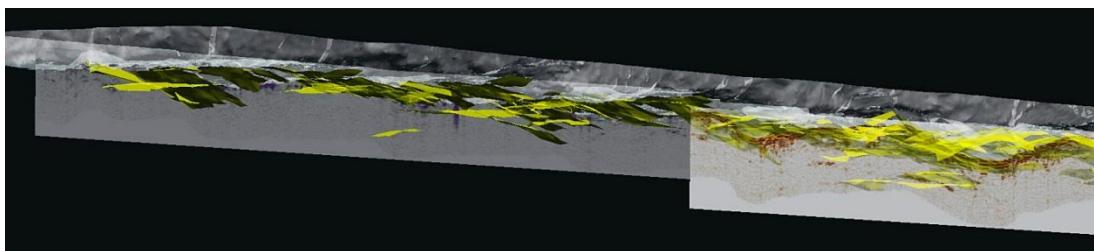
Mapping of blast fractures and distribution of blast fracture length in the bottom holes in TAS04. The plot to the right displays the minimum, maximum and median values as well as 25 and 75 percentiles.

4 Resultat från geofysik och skadeutbredning

GPR-metoden bygger på reflektioner av elektromagnetiska fält. Vid mätning sänder GPR-antennen en elektromagnetisk puls, en signal, som påverkas av de elektriska egenskaperna (ledningsförmåga, dielektricitetskonstant) hos det undersökta mediet. Signalen penetrerar, reflekterar eller böjer av från ”elektriska gränser”. Om signalen reflekteras kommer den tillbaka till antennen och ett radargram, en ”GPR-bild”, skapas. En GPR-bild kan indirekt visa på förekomst av enskilda sprickor, områden med förhöjd sprickfrekvens eller bergvolym med förhöjd porositet.

Den höga radarfrekvens som använts i dessa undersökningar innebär en stark signaldämpning som begränsar djuppenetrationen av signalen, som i denna undersökning motsvarar ett maximalt djup av ca 1 m. Mätupplösningen i vertikalled under dessa förhållanden har varit ca 6 cm. Pga. direkta vågor och ytnära reflektioner maskeras signaler som innebär att tolkning inte är tillförlitlig förrän under ca 8 cm djup. Vid tolkning av reflekterande enstaka sprickor bör man notera att metoden endast ger utbredningen av subhorisontella strukturer. GPR-metoden är begränsad till sprickor som är flackare än ca 45 graders vinkel mot mättningsplanet. I den genomförda geofysiska analysen föreskrevs att en tolkningsbar reflektor skulle gå att följa över minst fyra parallella scanning-linjer. Det innebär att tolkade reflektorer har minst en utbredning av 0,3 m.

Från en 3D-modell, där alla tolkade reflektorer inkluderas, är det möjligt att bestämma strukturernas orientering (strykning och skenbar stupning). I Figur 5 exemplifieras en delmängd av de tolkade reflektorerna. Resultaten kan också användas för att studera reflektorernas längdfördelning eller densitetsfördelning. I TAS04-projektet var det totala antalet tolkade reflektorer 130 st. Reflektorer kortare än 0,3 m togs inte med i tolkningen. Reflektorernas tolkade längder var max 3,8 m i riktningen parallellt till tunneln och 2,0 meter i den vinkelräta riktningen. Den genomsnittliga reflektorlängden horisontellt längs tunneln bestämdes till 0,91 m och tvärs tunneln till 0,61 m.



Figur 5. En 3D vy över tolkade GPR-reflektorer under golvet i TAS04

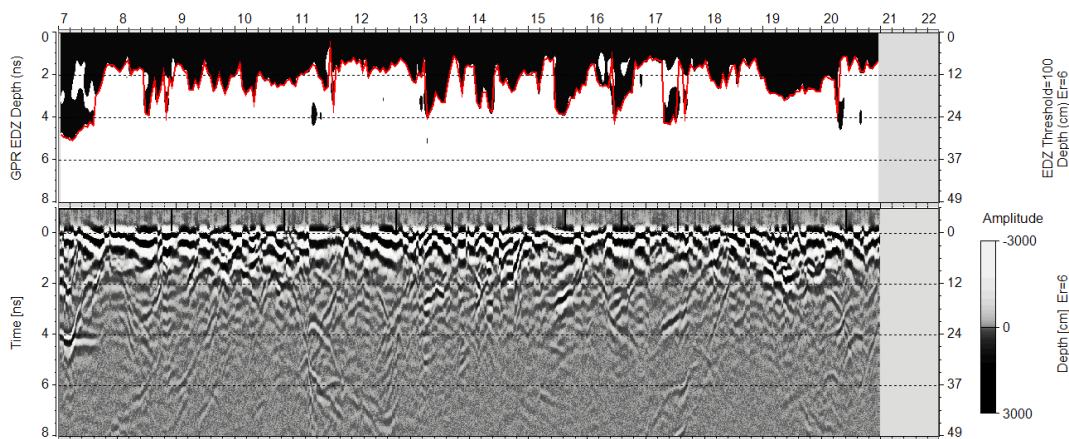
A 3D view of interpreted GPR reflectors beneath the floor in TAS04.

I analysen av GPR-data är det även möjligt att undersöka djupvariationen för sprängskadan utmed respektive scanning-linje. I GPR-analysprogrampaketet RoadDoctor Rock finns modul för en komplex signalanalys av GPR-data. Programmet ger möjligheten att tolka, och presentera, en nedre gräns för sprängskadezonens utsträckning mot djupet. Vid en sådan presentation är det nödvändigt att föreskriva GPR-responsen med en tröskelnivå som antas motsvara ett proxivärde för sprängskadan. Man kan säga att man konditionerar EDZ-bestämningen med hänsyn till faktiska andra fysiska bestämningar av sprängskadedjupet. I undersökningarna i TAS04 valdes tröskelvärde med hjälp av resultat från borrhålskartering och från hydrauliska mätningar för att få bästa passform med observerade funktioner. Tröskelvärde är en funktion av det valda frekvensbandet,

amplitud-spektrumet, valda tidsfönstret och längdsteget. I passningen med referensinformationen gav tröskelvärdet 100 (medelamplitud i frekvensfönster som matchas mot referensinformation) det bästa resultatet och djupvariationen i den beräknade gränsytan, som tolkas som EDZ-gränsyta, kan visualiseras längs mätlinjen. Genom att kombinera alla resultat från flera mätlinjer, utarbetades en yttäckande karta som anger djupvariationen för en bedömd sprängskadad zon. Figur 6 visar ett exempel med det bedömda EDZ-djupet längs en mätlinje från 7-21 m i TAS04.

När det gäller markradarundersökningar, GPR-mätningar, och dess möjligheter till att bedöma skadezonsutbredning kan man utifrån erfarenheterna i tunnel TAS04 dra följande slutsatser:

- Geologisk kartering på tunnelytor och på borrhälsar är nödvändig för att kalibrera och tolka GPR-data.
- Det är nödvändigt att göra platsspecifika anpassningar/ inställningar för GPR-mätningarna.
- Resultater från reflektorer ger en god bild av subhorisontella sprickfördelningar och utbredningar. Vertikala strukturer fångas ej vid mätningen.
- Det är svårt att explicit avgöra om indikerade sprickor (reflektorer) är orsakade av sprängning eller ej.
- Om GPR-data kalibreras mot andra fysiska data kan en god uppskattning av EDZ erhållas med hänsyn till mätningens detekterbarhet och spatiala upplösning



Figur 6. En 2D presentation med bedömt sprängskadedjup utmed en central scanninglinje, 7–21 m, i TAS04. Den undre bilden visar rådata-visualisering.

A 2D GPR EDZ output on top of original GPR data, profile measured at the centre line in TAS04 range 7 – 21

För TAS04 visar GPR-resultaten att ned till 0,20 - 0,30 m är tunnelgolvet mer uppsprucket än i de djupare delarna. I vissa avsnitt har emellertid ingen ökad sprickbildning detekterats, vilket tyder på att ingen spränginducerad skada har skett där. Det kan också noteras, vilket kan bekräftas genom enskilda scanning-profiler, att det finns områden där det inte finns något ökat antal reflektorer djupare än 0,1 meter från tunnelgolvet och där tolkningen av sprängskadan genom GPR-data således heller inte visar någon djup inträngning. Genom den geofysiska mätningen indikerar detta att EDZ är begränsad i omfattning och är inte kontinuerlig under den undersökta golvytan.

5 Hydrauliska egenskaper i skadezon

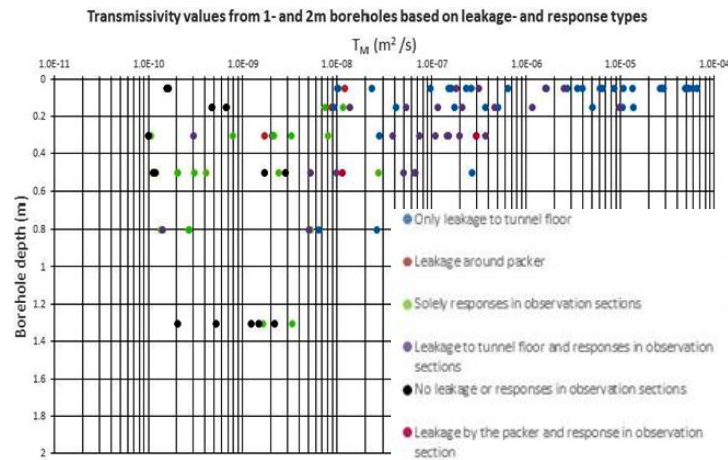
I samband med EDZ-karaktäriseringen av TAS04 har de hydrauliska testerna fokuserat på sektionstransmissiviteter, specifika kapaciteter och flödeskonnektiviteter. Eftersom bedömningen av den långsiktiga säkerheten för ett kärnavfallsförvar är baserad på vattenmättade förhållanden omfattade testerna och analyserna inte metoder som inkluderar omättade situationer även om tunnlar och nischer är öppna och i atmosfärskontakt. Vid utvecklingen av en lämplig hydraulisk testmetod, beaktades ett flertal aspekter, t.ex. val av testvolym, utrustningens robusthet, utrustningens mobilitet, mätupplösning, initial- och randvillkor, öppna eller slutna magasinförhållanden, hydro-mekaniska kopplingar och testernas varaktighet. Dessutom, för utvärdering och tolkning av test-responser vad gäller flöde och tryckförändringar, har det varit nödvändigt att beakta heterogenitet, anisotropi (hydrauliska och strukturella), rumslig variabilitet och skalberoende. Olika praktiska aspekter och deras konsekvenser för testutvärderingen har också uppmärksamats.

Vid experimentet har det inte varit möjligt att bestämma transmissivitet av enskilda sprickor under tunnelgolvet i djupintervallet för en potentiellt störd zon. Därför har studien fokuserat på att mäta flöden i korta vertikala borrhål, som i sin tur var indelade i flera kortare sektioner med hjälp av manschetter, se avsnitt 3.3. Stationära sektionstransmissiviteter utvärderades med hjälp av Moyes formel (Moyes, 1967). Denna formel förutsätter att borrhålet är en linjekälla, dvs testsektionens längd är mycket större än diametern, vilket inte är fallet i denna studie (slankheter för mätsektioner i projektet r_w/L varierar från 0,027 till 0,38). En känslighetsanalys avseende lämplig analysmetod för de stationära injektionstesterna konstaterade att Moyes formel är det mest konservativa sättet att utvärdera sektionstransmissiviteter (Ericsson et al., 2015).

I det nedanstående redovisas några utvalda resultat från projektet i TAS04 vid Äspö. För en fullständig resultatredovisning hänvisas till Ericsson et al. (2015).

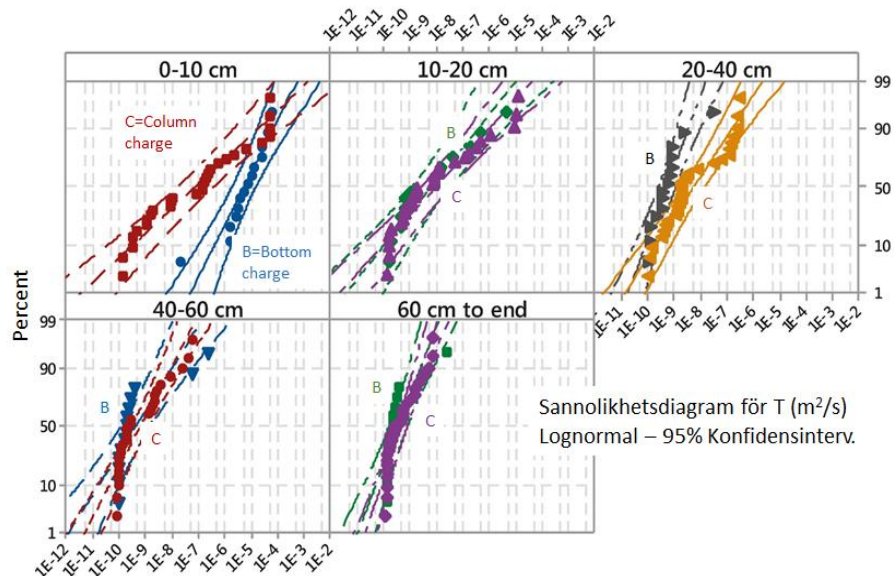
Tolkade sektionstransmissiviteter som funktion av borrhålsdjup från alla stationära injektionstester visas i Figur 7. Av figuren framgår att beräknade transmissiviteter kan vara höga i de översta nivåerna som ofta är hydrauliskt förbundna med tunnelgolvet. Värdena minskar med djupet. Relativt höga transmissiviteter uppskattades för sektioner ned till 0,40 - 0,60 m i många av borrhålen. Det bör noteras att enligt en känslighetsanalys

kan transmissiviteterna på djup under 0,2 och i relativa termer vara överskattad med en faktor av ca 2-3 jämfört med de mer ytliga skikten (se Ericsson et al., 2015).



Figur 7. Transmissiviteter för alla sektioner som funktion av borrhålsdjup.

Estimated transmissivities for each section in all boreholes versus borehole depth.



Figur 8. Sannolikhetsdiagram över de tolkade transmissivitetsvärdena som erhållits från tester utförda i olika sektioner i bottenladdningsområden respektive i pipladdningsområden. Linjerna visar 95% konfidensintervall.

Probability plots of the interpreted transmissivity values obtained from tests conducted in different sections with bottom charge areas and column charge areas, respectively. The lines show the 95% confidence interval.

En ytterligare analys av genomsläpplighetsförhållanden och djupberoende redovisas i Figur 8. Analysen behandlar tolkade transmissiviteter som indelats med hänsyn till om borrhålen och deras mätsektioner placerats i områden för bottenladdning eller alternativt pipladdning. I sannolikhetsdiagrammen förväntas transmissiviteter följa en log-normal fördelning. Figuren visar att log-normal medelvärden för bottenladdningsområdena är betydligt (konfidsensintervall 95%) högre än värden för pipladdningsområdena på den ytliga nivån 0,0 - 0,1 m. På djupare nivåer är skillnaderna mellan de två laddningsklassificeringarna däremot inte så uppenbara. (De geofysiska och geologiska tolkningarna indikerar något större skadedjup vid bottenladdningar relativt pipladdningar). Detta innebär att hydrotesternas resultat indikerar en zonering för genomsläppligheten i de ytliga delarna av tunnelgolvet.

I samband med hydrotesterna har olika metoder använts för att bedöma konnektiviteter för de mest transmissiva sprickorna. Den längsta observerade konnektiviteten i projektet var 7 m men vanligtvis var flödessambanden mindre än 3m.

Från hydrotesterna och deras utvärdering vid experimentet i TAS04 vid Äspö kan man dra följande slutsatser:

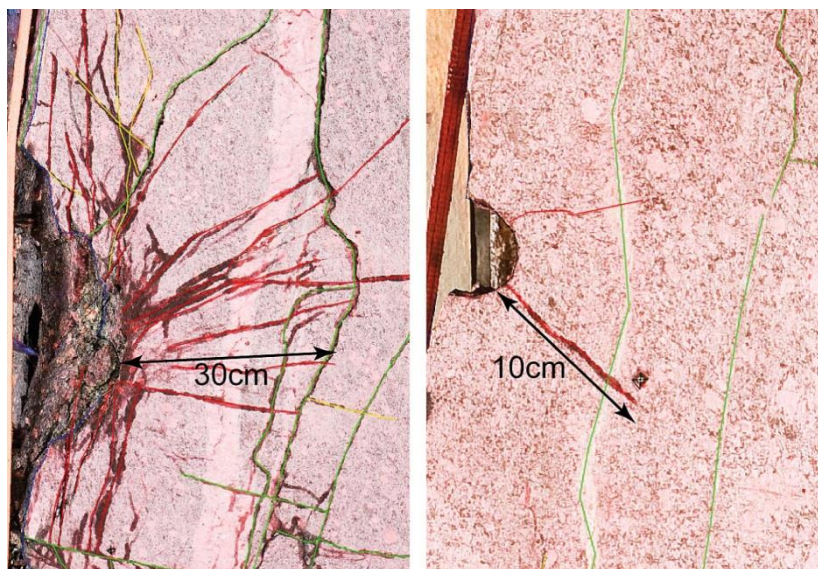
- Sprängningens effekt på genomsläpplighetsegenskaper skall ej ses som en separat process utan den överlagras såväl de naturliga förutsättningarna som effekterna av de spänningssamlagringar som sker pga. berguttaget i sig.
- Ur hydrauliskt perspektiv uppskattades, med hänsyn till geologisk och geofysisk tolkning, en påverkan i områden för bottenladdning ned till ca 0,5 m medan för resten av salvan, inom pipladdningen, skadedjupet bedömdes till max ca 0,3 m.
- Mätning av hydrauliska egenskaper bör uttryckas som specifika kapaciteter eller tolkade sektionstransmissiviteter med enhetliga specificerade testsektioner och testvaraktigheter. Utvärderingarna skall beakta initialvillkor, randvillkor och testningsskala.
- Man kan notera att om man vid TAS04 skulle avlägsna de översta 20 cm från golvet skulle genomsläppligheten i längdled utmed tunnelgolvet minska med flera tiopotenser.

6 Diskussion och slutsatser

Den sprängdesign som tillämpats de senaste utbyggnadsetapperna på Äspö har alltid visat på att spränginducerade sprickor främst är sub-parallella med konturen, vare sig det är i kontur eller i sula. Undantag utgörs av bottenladdningen, där inducerade sprickor strålar ut åt alla håll, även in i berget.

Värdefulla allmänna observationer är främst:

- Spränginducerade sprickor har låg frekvens och relativt flest spränginducerade sprickor finns inom området för bottenladdning i slutet av varje salva. Där uppskattas skadedjupet mätt med geofysiska metoder till ca 0,5 m, medan skadedjupet för resten av salvan inom pipladdningen bedöms vara ca 0,3 m, se Figur 9.
- Trots låg magnitud på in-situ bergspänningar kan man inte utesluta att dessa kan ha viss påverkan på skadezonen, eftersom det teoretiskt uppstår en liten hävning av golvet när tunneln tas ut. Både spännings- och sprängningsinducerade sprickor utvecklas främst sub-parallellt med tunnelgolvet.
- Omfattning av och konnektivitet för inducerade sprickor kan bara bedömas med indirekta metoder, såsom hydrotester i borrhål eller kombination av geologisk och geofysisk dokumentation.
- De flesta injektionstesterna med transmissivitet $> 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ läckte till tunnelgolvet, troligen via sprickor som inducerats eller påverkats vid tunneluttaget (av sprängning och/eller spänningsomlagring).
- De högsta transmissiviteterna återfanns ytligt, samt i läge för bottenladdningen.
- Konnektiviteten mellan inducerade sprickor är begränsad.



Figur 9. Exempel på skada från bottenladdning (vänster) och pipladdning (Olsson m fl, 2009).
Example of blast damage from bottom charge (left) and cloumn charge (Olsson et al, 2009).

Den sammanlagda bilden av dessa observationer är att den sprängdesign som kommer från Svensk detonikforskning, och som tillämpats i bl.a. detta projekt är mycket skonsam mot berget. Momentan upptändning i konturen och lämpligt hålavstånd med hänsyn till de klena laddningarna i konturen bryter i huvudsak berg mellan konturhålen och gör mycket liten skada. De empiriskt bedömda spricklängderna verkar stämma tämligen väl,

men de är inte ett direkt mått på sprängskadans utsträckning in i berget, utan snarare ett mått på den maximala spricklängden sub-parallellt med konturen (Ittner et al. 2015). Detta gäller dock inte i den begränsade del av salvan som påverkats av bottenladdningen. Sprängningen förefaller att ge mikroskopiska skador i intakt berg något djupare än de makroskopiska sprickorna. Sådana resultat kan bara bekräftas med geofysiska mätningar på tunnelkonturen eller på prover i laboratorium och torde sakna praktisk betydelse i ett traditionellt tunnelprojekt.

Äspöprojektets observationer gäller i berg inom spannet, tämligen god till god bergkvalité, dvs. ovittrad berggrund med tämligen normal sprickfrekvens. Förmodligen kan man förvänta sig större påverkan i sprickzoner där spränggaserna kan finna flera vägar in i omgivande berg.

Det är därför rimligt att förutsätta att de flesta tunnelprojekt i berg av god kvalitet med rimlig kontroll av borrning och laddningsmängder kommer att få en bra konturhållning med lite överberg, måttfullt skrotningsbehov (utom i salvslut) och minimal påverkan på stabiliteten av sprängningen. Graden av kontroll av borr- och laddningsparametrar beror på ambitionsnivån. Det verkar dock som att dagens loggerutrustningar i borr- och laddutrustning är tillräckligt noggranna för att kunna nyttjas åtminstone för relativa kontroller av utfört arbete.

Eftersom de spränginducerade sprickorna är korta och få, förutom inom bottenladdningsområdena, är tolkningen att den hydrauliska konnektiviteten i axiell led är begränsad (se även Ericsson et al., 2009). Grundvattnets trycknivåer ca 0,5 m under sulan visar stora variationer och styrs av de naturliga sprickornas genomsläpplighet. Huvuddragen för inflödesmönstret styrs av de naturligt förekommande sprickorna och zonerna. Detaljmönstret för inläckaget styrs i sin tur av sprängskadeomfattningen och dess mer eller mindre uttalade zoner. I trafiktunnlar råder varierande grad av vattenmättnad med hänsyn till spränggaser, injekteringsutformning, ventilation etc. Om vattenmättnad råder nära tunnelvägg kommer en sprängskadad zon att omfördela det radiella inflödet så att merparten av inläckaget sker vid sulan (se Christiansson et al, 2009). Om icke vattenmättnad råder i EDZ kommer det radiella inläckagemönstret vid vägg sannolikt att påverkas så att mer vatten flödar mot sulan och att tunneldropp styrs av undertrycksgradients och ”filmflöden” i sprickor. Den s.k. skinfaktorn som används vid inläckageberäkningar för såväl oinjekterade som injekterade tunnlar är att betrakta som ett slags övergångsmotstånd där ovanstående processer förekommer i kombination med vattenkemiska förändringar och bergspänningsomlagringar. Denna komplexa och svårpredikterade hydrauliska situation bidrar till att tunneldränens funktion är svåra att förutspå.

Referenser

Bäckblom G., 2008. Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. SKB Report TR-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Christiansson R., Ericsson L. O., Gustafson G., 2009. Hydraulic characterisation and conceptual modelling of the Excavation Disturbed Zone (EDZ). Proceedings from SINOROCK 2009 in Hong Kong, ISRM International Symposium on Rock Mechanics, Rock Characterization, Modeling and Engineering Design Methods.

Ericsson L. O., Brinkhoff P., Gustafson G., Kvartsberg S., 2009. Hydraulic Features of the Excavation Disturbed Zone – Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. SKB Report R-09-45, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Ericsson L. O., Thörn J., Christiansson R., Lehtimäki T., Ittner H., Hansson K., Butron C., Sigurdsson O., Kinnbom P., 2015. A demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone. Experience from the Äspö Hard Rock Laboratory. SKB Report R-14-30, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

Ittner H., Bouvin A. 2015. Underökning av sprängsprickor från mekaniserad laddning med bulkemulsion i bergtunnel. BeFo-rapport 144. Stiftelsen Bergteknisk Forskning. Stockholm

Karlzén R., Johansson E. 2010. Slutrapport från drivningen av TASS-tunneln (In Swedish). SKB Report R-10-31, Svensk kärnbränslehantering AB. Stockholm.

Kantia P, Silvast M, Wiljanen B, Heikkinen E, Lehtimäki T, 2010. EDZ assessment in various geological environments using GPR method. Posiva Working Report 2010-04, Posiva Oy, Finland.

Moye D. G., 1967. Diamond Drilling for Foundation Exploration. Paper 2150 presented at I.E.Aust. Site Investigation Symposium, September 1966. Civil Engineering Trans.

Olsson M., Ouchterlony F., 2003. Ny skadezonsformel för skonsam sprängning. SveBeFo Report 65. Swedish Rock Engineering Research. Stockholm, Sweden.

Olsson M., Niklasson B., Wilsson L., Andersson C., Christiansson R. 2004. Experiences of blasting of the TASQ tunnel. SKB Report R-04-73, Svensk kärnbränslehantering AB. Stockholm.

Olsson M., Markström I., Pettersson A., Sträng M. 2009. Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB Report R-09-39, Svensk kärnbränslehantering AB. Stockholm.

Svensk Byggtjänst, 2014. AnläggningsAMA 13.