BERGMEKANISKA ANALYSER FÖR BOLIDENS DJUPFÖRVAR VID SMÄLTVERKET RÖNNSKÄR

ROCK MECHANICAL ANALYSES FOR THE BOLIDEN DEEP REPOSITORY AT RÖNNSKÄR

Mikael Svartsjaern, Itasca Consultants AB
Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB
Daniel Sandström, Boliden Mineral AB
Ida Tjerngren, Boliden Mineral AB
David Wladis, Hydrosense
Christian Andersson Höök, Sweco

SAMMANFATTNING

Boliden anlägger ett djupförvar för slutlig deponering av processavfall vid kopparsmältverket Rönnskär. Förvarsanläggningen anläggs på ett djup av ca. 330 m, och omfattar en ramp från markytan, en anslutningsort samt ett antal större förvarsrum med 16 m bredd och 18 m höjd. För att uppfylla geomekaniska och hydrogeologiska krav från myndigheter och från Boliden själva har bergmekaniska analyser av förvaret genomförts. Detta har innefattat stabilitetsanalyser av förvarsrummen, optimering av rumsgeometrier, samt studier kring huruvida byggandet av förvarsrummen samt framtida deformationer och/eller blocknedfall kan leda till att nya flödesvägar öppnas, något som är kritiskt för anläggningens långtidsfunktion. Påverkan på flödesvägarna har bedömts ur ett långtidsperspektiv med tidsperioden 3000 år som referenstid. Beräkningar har utförts med tredimensionella numeriska modeller med såväl kontinuum- som diskontinuum-ansats. Långtidspåverkan har beaktats via reducering av hållfasthetsparametrar. Resultaten visade på låg risk för hydraulisk koppling mellan förvarsrum och existerande borrhål eller ramp. Förvarsutformningen bedöms vara långsiktigt globalt stabil även utan tillgodogörande av bergförstärkningens effekter och oavsett fyllnadsgrad. Förstärkningsåtgärder krävs dock för att säkra lokal stabilitet under bygg- och driftskedet av förvaret. Ett bergmekaniskt mät- och uppföljningsprogram har tagits fram i syfte att validera beräkningsmodellerna under den drivning som för närvarande sker.

Nyckelord: *Spänningsanalys, långtidspåverkan, global/lokal stabilitet, kontinuum- och diskontinuumanalys*

SUMMARY

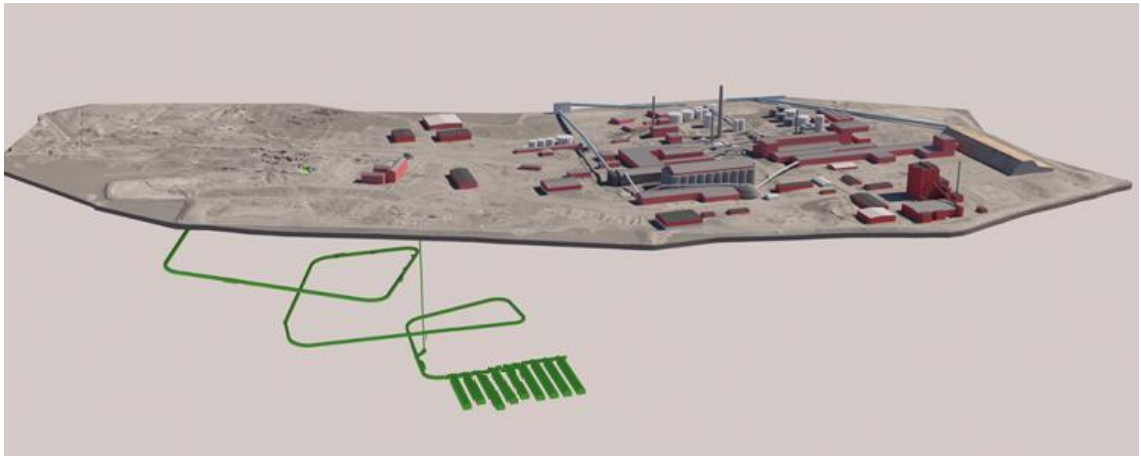
Boliden is currently constructing a deep repository for final storage of process waste at the copper smelter Rönnskär. The repository is excavated at a depth of approximately 300 m, and comprises a ramp from the ground surface, a connection drift, and a number

of larger repository rooms, 16 m wide and 18 m high. To satisfy geomechanical and hydrogeological regulatory and internal requirements, a number of rock mechanical analyses have been conducted. The work has included stability analyses of the repository rooms, optimization of geometries, and studies regarding how the excavations and future deformations and/or block fall-outs can result in new flow pathways. The latter is critical to the long-term function of the repository. The influence on flow pathways was judged in a long-term perspective, with 3000 years as a reference time frame. Calculations were performed using three-dimensional numerical models using both continuum and discontinuum approaches. The long-term effects were considered via reducing strength parameters. The results indicated a low potential for hydraulic coupling between repository rooms and existing boreholes or the ramp. The design is judged to be long-term stable even without considering rock reinforcement and regardless of filling ratio. Reinforcement is, however, necessary to ensure local stability during the excavation and operation stage. A rock mechanics monitoring program was developed with the aim to validate the numerical models during the currently on-going construction.

1 INLEDNING

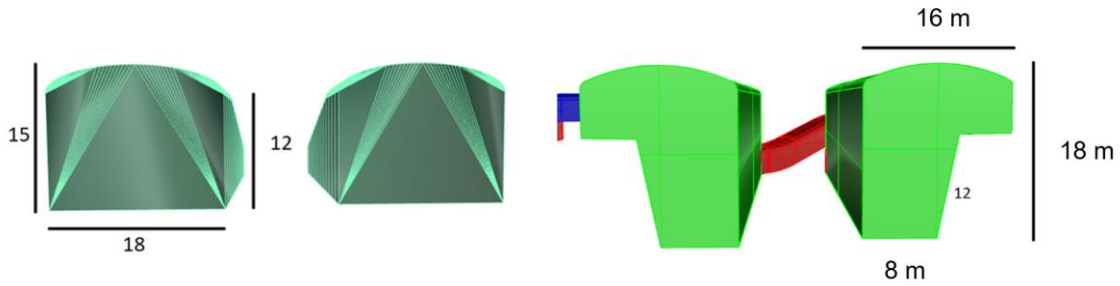
Boliden Mineral AB bygger för närvarande ett underjordsförvar för permanent lagring av kvicksilverhaltiga och andra farligt processavfall från Rönnskärs smältverk. Underjordsförvaret ligger på Rönnskärs industriområde i Skelleftehamn och kommer, när allt är klart, att bestå av en ramp från dagen med tillhörande infrastruktur och ett antal stora förvarsutrymmen belägna på 330 m djup under markytan.

Varje rum består av ett inslag samt en huvudsaklig förvarsdel, se Figur 1. Efter deponering försluts djupförvaret med plugg i ramp och i urval av borrhål, samt återfyllning av anslutningsort. Efter slutstängning av förvaret kommer samtliga områden att vattenmättas med tiden. Redovisad utformning i Figur 1 avser den utformning som var aktuell i maj, 2018.



Figur 1 Principiell utformning av underjordsförvaret gällande per 2018-05-09.

Denna har sedermera optimerats med avseende på deponeringsteknik samt hydrogeologiska och bergmekaniska aspekter. Den reviderade utformningen innefattar rum med 16 m bredd och 18 m höjd samt med en berghylla i vägg för att fungera som upphöjd körbana vid deponering enligt Figur 2. Utsprängning av bergrum pågår och anläggningen förväntas tas i drift 2021.



Figur 2 *Ursprunglig utformning (vänster bild) och reviderad utformning (höger bild) för bergrummen i djupförvaret.*

För att uppfylla geomekaniska och hydrogeologiska krav från myndigheter och från Boliden själva har bergmekaniska analyser av förvaret genomförts. Detta har innefattat stabilitetsanalyser av förvarsrummen, optimering av rumsgeometrier, samt studier kring huruvida byggandet av förvarsrummen samt framtida deformationer och/eller blocknedfall kan leda till att nya flödesvägar öppnas i närhet till förvarsrum, något som är kritiskt för anläggningens långtidsfunktion. Påverkan på flödesvägarna har bedömts ur ett långtidsperspektiv med tidsperioden 3000 år som referenstid. Alla analyser har utförts på en nivå som gör att ställda krav kan uppfyllas, med huvudsyftet att identifiera och åtgärda eventuella risker med vald design och läge på förvarsrummen.

2 GEOMEKANISKA FÖRHÅLLANDEN

Berggrunden under Rönnskärsverken där djupförvaret anläggs utgörs av huvudsakligen gnejs av sedimentärt ursprung. Rampen ned till förvarsdjupet ligger huvudsakligen i en angränsande tonalit. Bergvolymen som är vald är prognosticerad att ha låg hydraulisk konduktivitet. Drivning av anslutningsorten visar att det endast förekommer mindre vattendropp. Kärnborrning har utförts från markytan med tillhörande geologisk och bergmekanisk kärnkartering. Vidare har bergmekanisk kartering av exponerade bergytor genomförts under pågående rampdrivning. I läget för varje förvarsrum borras pilothål för att bedöma lokal bergkvalitet. Vidare karteras exponerat berg när rummen tas ut för att bekräfta uppskattad bergkvalitet.

Bergmassan är generellt sett av bra kvalitet, med *GSI*-värden runt 80 och *RQD*-värden över 90. I ett tidigt skede utfördes laboratorietester på intakt berg, vilket visade på en enaxiell tryckhållfasthet på 225 MPa (medelvärde) med liten spridning. Höga värden på elasticitetsmodul (ca. 80 GPa) erhölls också vid dessa tester. För indata till de berg-

mekaniska beräkningarna har bergmassans egenskaper bestämts baserat på utförda tester och karteringar via Hoek-Browns brottvillkor följt av en linjär anpassning till Mohr-Coulombs brottvillkor, där typ- och uppskattade minvärden har tagits fram.

Baserat på strukturgeologiska studier samt utförda undersökningar har också ett antal storskaliga strukturer i form av svaghets- eller deformationszoner definierats kring planerat djupförvar. Tre zoner bedömdes vara av sådan karaktär att de kan ha en bergmekanisk påverkan. Dessa beskrivs som spröda strukturer med delvis vattenförande sprickor. Data från kärnkarteringar indikerar dock ingen signifikant avvikande bergkvalitet i läget för zonerna vilket också bekräftats vid rampdrivning. Zonernas skärningar med rampen indikerar inga stabilitetsproblem, men har för vissa fall föranlett tillägg av sprutbetong samt extra bultning, men inte någon förändring i tunnelkonturen efter berguttag. Ett visst ökat vattenflöde uppfattades dock i förekommande områden. Den bergmekaniska påverkan från angivna zoner bedöms därför vara liten och försumbar, och zonerna har inte inkluderats i stabilitetsberäkningarna. Zonernas relativa position har dock beaktats vid bedömningen av påverkan på framtida flödesvägar.

Sprickkarteringar har identifierat tre huvudsprickgrupper som anses vara representativa för hela bergmassan som omger förvarsområdet, se Tabell 1. Kompletterande sprickkartering samt karaktärisering av bergkvalitet görs av entreprenören i samband med uttag av anslutningsorter och bergrum. Sprickegenskaper för nyttjande i beräkningarna har uppskattats baserat på karteringsvärden och erfarenhet.

Tabell 1 Huvudsprickgrupper, orientering och internt medelavstånd för karterade sprickor i förvarsområdet.

Sprickgrupp	Strykning (°)	Stupning (°)	Medelsprickavstånd (m)	Intervall (±m)
1	008	06	4,2	1,0
2	274	88	14,6	4,4
3	012	81	16,1	4,8

Bergspänningsmätningar har utförts på 295 m nivå med den s.k. LVDT-metoden. Resulterande bergspänningar redovisas i Tabell 2. De uppmätta nivåerna användes för att ta fram ett linjärt spänningssamband som en funktion av djupet och som indata till bergmekaniska beräkningar.

Tabell 2 Initialspänningar från mätningar på nivå 295 m (Hakala, 2018).

Spänningskomponent	Magnitud (MPa)	Orientering (°) – lokalt norr
$\sigma_1 = \sigma_H$	21,5±3	060±8
$\sigma_2 = \sigma_h$	11±3	150±8
$\sigma_3 = \sigma_v$	8	vertikal

3 BERGMEKANISKA ANALYSER

3.1 Angreppssätt och metodval

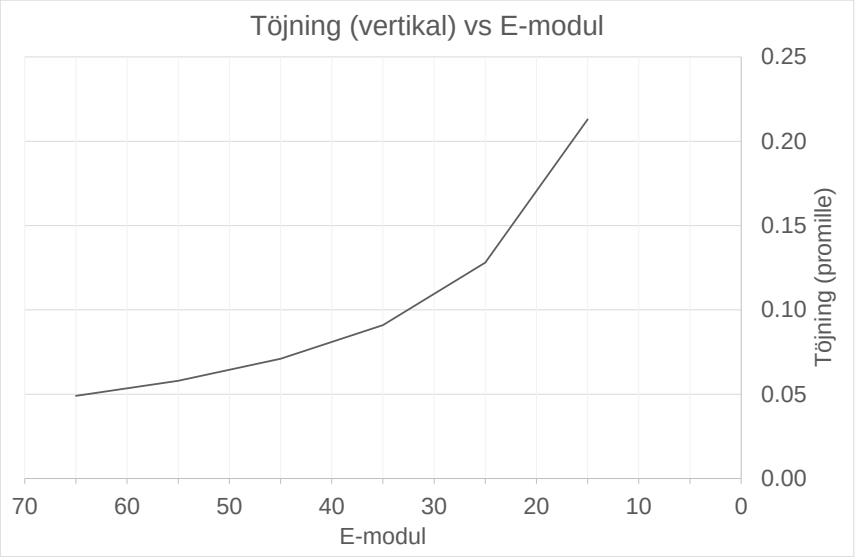
För att uppfylla ställda krav har bergmekaniska analyser utförts i form av numerisk modellanalys kompletterat med analytiska beräkningar och erfarenhetsmässiga bedömningar. I denna artikel redovisas endast de bergmekaniska beräkningarna. Hydrogeologiska analyser i syfte att bedöma vattenföring i förvarsområdet har utförts i separat studie. I de bergmekaniska beräkningarna har dock inverkan på flödesvägar studerats. Beräkningar har utförts med tredimensionella numeriska modeller med såväl kontinuum- som diskontinuum-ansats. Långtidspåverkan har beaktats via reducering av hållfasthetsparametrar. Kontinuum-beräkningar har utförts med finita differensprogrammet *FLAC3D* (Itasca, 2018a) och diskontinuum-analyser har utförts med distinkta elementprogrammet *3DEC* (Itasca, 2018b).

3.2 Markdeformationer

Omgivningspåverkan på markytan analyserades med en storskalig elastisk modell i vilken förvarsområdet förenklades till ett rätblock som inrymmer hela den framtida anläggningen exklusive accessrampen från dagen. Rätblocket togs ut i ett steg och påverkan på markytan i form av sättningar studerades för ett intervall av styvheter på bergmassan. Denna modell bedöms ge ett mycket konservativt mått på markpåverkan.

Det finns idag ingen gällande lagstiftning eller praxis vad gäller markpåverkan som kan anses "signifikant". Generellt sett gäller att en enhetlig (likformig) deformation ger inte upphov till några strukturella förändringar. Differentiella deformationer – i både horisontell och vertikal riktning – är således de som kan ge upphov till skador på infrastruktur. Av detta följer att skadekriterier vanligen formuleras i termer av horisontell töjning och/eller skjuvtöjning (tiltning/lutning). Ett praktikfall där gränsvärden för tillåten markpåverkan definierats är LKAB:s gruva i Kiruna, där Miljödomstolen fastställde ett villkor för markdeformationer 2009-07-31 (Sjöberg m.fl. 2011). Detta villkor säger att marken inte får påverkas med mer än 2 ‰ i vertikal led eller 3 ‰ i horisontell led, d.v.s. tiltning (vertikalt) och töjning (horisontellt).

För analys av potentiell omgivningspåverkan från djupförvaret har vertikaltöjning/tilt och med värden enligt ovan använts som gränsvärdeskriterium. Beräkningar utfördes för ett antal uppskattade bergstyvheter varav 35 GPa bedöms vara lägsta "sannolika" styvhet och 76 GPa mest troliga värde. Vertikaltöjningen beräknades baserat på deformationsprofilen på markytan och redovisas i Figur 3. Den mest konservativa modellen uppvisar som mest vertikaltöjningar i storleksordningen 1/10 av referens-villkoret 2 ‰. Vidare analyserades olika ansatta spänningsfält, inklusive ett hypotetiskt gravitativt spänningsfält. Resultaten visar att markpåverkan är okänslig för variationer i det lokala spänningsfältet och att sättningen till största delen styrs av materialets egentyngd och styvhet. Påverkan på markytan (deformationer) till följd av förvarsbygget bedöms vara mycket liten – mindre än 10% av allmänt accepterade villkor för markpåverkan på infrastruktur.



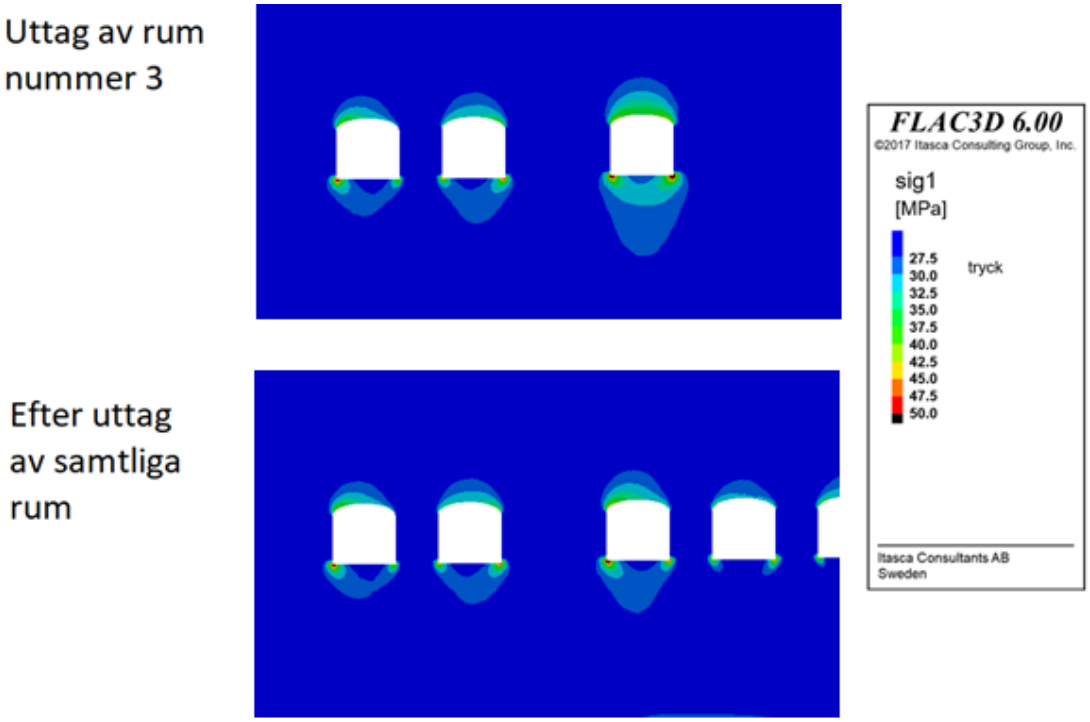
Figur 3 Beräknad vertikal töjning på markytan till följd av uttag av djupförvaret.

3.3 Spännings- och deformationsanalys

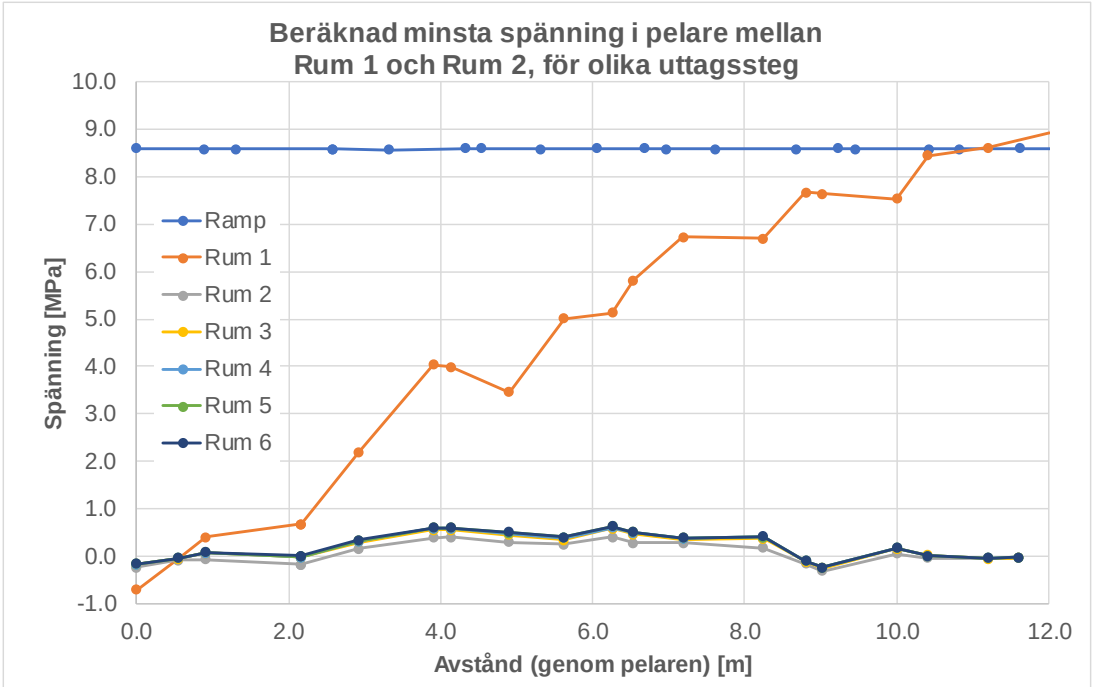
Den storskaliga stabiliteten för förvarsanläggningen har studerats via en elasto-plastisk kontinuum-modell där djupförvaret simulerats i full detalj för samtliga rum och anslutningsort med en antagen uttagssekvens från väster till öster följande uttaget av anslutningsorten. Accessrampen till dagen har inte inkluderats i modellen. Med denna modell har också den lokala stabiliteten för de olika pelar- och rumsgeometrierna studerats. Modellresultaten har också till viss del använts för att undersöka den bergmekaniska inverkan från förvarsanläggningen på flödesvägar i bergmassan. Beräkningarna utfördes för ursprunglig utformning för bergrummen, se Figur 2.

Resultaten visade att spänningsomlagringen kring rummen är som störst under rummets byggskede för att sedan minska något vid uttag av nästkommande rum. Ett exempel visas i Figur 4. Motsvarande resultat erhölls också för minsta huvudspänning i pelaren mellan bergrummen. Pelarbredden har stor inverkan på framförallt kvarvarande inspänning (minsta huvudspänning) i pelarmitt efter rumsuttag. Vid pelarbredd på ca. 20 m sker ingen signifikant avlastning i pelarens mittpunkt vid uttag av närliggande rum. Dragspänningar uppkommer under vissa skeden, främst i tunna pelare, mest uttalat direkt efter pelarens uppkomst. Ett exempel på förändringar i minsta huvudspänning visas i Figur 5, illustrerat som spänning längs en linje mellan rummen genom pelarens centrum. Resultaten visade också att spänningsomlagringarna från uttag av de enskilda förvarsrummen inte påverkar accessrampen. Det gäller således också för det vertikalschakt som planeras att anläggas i samma område.

Möjligheten för ny sprickbildning undersöktes genom att utvärdera potentialen för spjälkningsbrott på två sätt med hjälp av elastisk spänningsanalys för den detaljerade förvarsutformningen: (i) jämförelse av tangentialspänning med "crack initiation stress", se t.ex. Martin & Chandler (1994) och (ii) Staceys dragtöjningskriterium (Stacey, 1981).

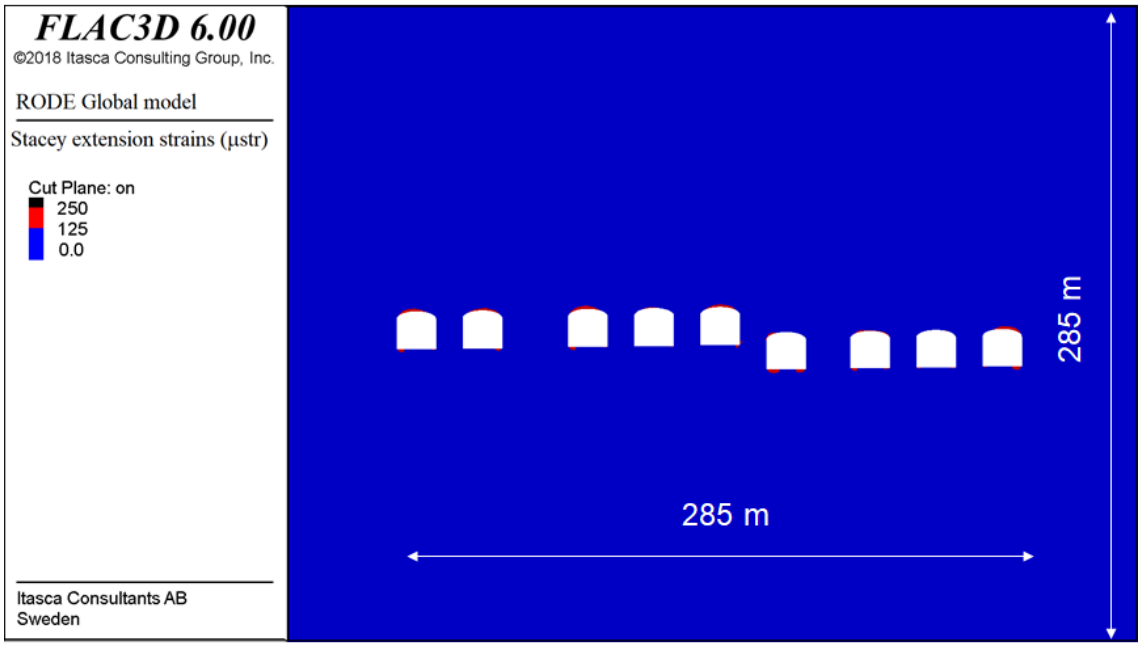


Figur 4 *Beräknad största huvudspänning efter uttag av rum nummer 3 (övre bild) och efter uttag av samtliga rum (nedre bild).*



Figur 5 *Magnitudförändring i minsta huvudspänning genom pelare A vid sekventiellt rumsuttag, notera att vissa dataserier är överlagrade i figuren.*

Största beräknade tangentialspänning är i storleksordningen 50 MPa, vilket en försumbar potential för spjälkningsbrott även enligt utvärderingen mot "crack initiation stress" (110 MPa). Utvecklingen av dragtöjningen (ε_{3max}) följer spänningsutvecklingen eftersom dragtöjningen är proportionerlig mot spänningsdifferensen. Maximala dragtöjningen i en pelare uppkommer vid uttag av rummen på ömse sidor om pelaren. Vid beräkning av dragtöjningar med utgångpunkt från ett sannolikt värde på elasticitetsmodulen för det intakta berget (76 GPa) indikeras enbart initierande spjälkning (gränsvärde 125 µstrain) kring takvalven och i rumssulorna, se exempel i Figur 6.



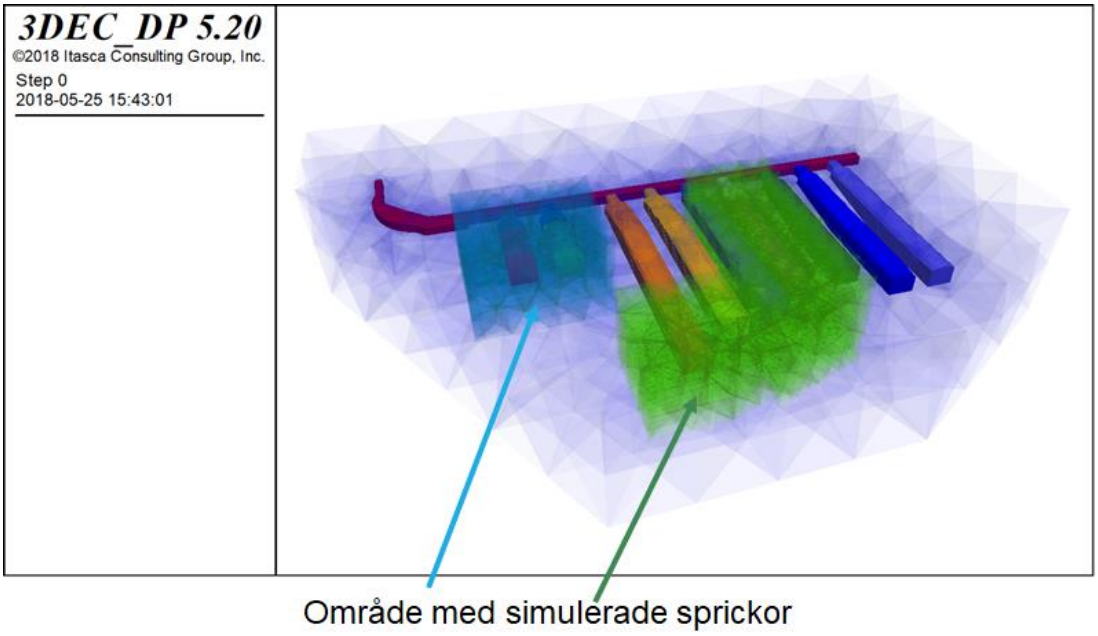
Figur 6 *Beräknad dragtöjning kring förvarsrum efter uttag av hela förvarsområdet.*

Plasticering av bergmassan i modellen är i stort sett obefintlig vilket innebär att uppkomna deformationer kan anses elastiska eller, i förekommande fall, orsakade genom aktivering av enskilda sprickplan. De totala deformationerna vid uttag av förvaret förväntas bli små, understigande ca. 5 mm. Deformationsmönstret innebär låg risk för sprickbildning från "knäckning" p.g.a. hävning i tak. Deformationerna är som störst under rummets byggskede för att sedan minska något p.g.a. elastisk återhämtning när rummet hamnar i spänningsskugga från nästkommande uttag. Av de totala deformationerna förväntas att upp till ca. 2/3 av deformationen ske framför och vid stuffen varför de mätbara deformationerna förväntas vara i storleksordningen 2–3 mm.

3.4 Sprickpåverkan och långtidseffekter

En diskontinuum-analys där befintliga spricksystem inkluderats i två bedömt kritiska områden av förvaret har genomförts i syfte att studera lokal stabilitet, se Figur 7. Bergblocken i modellen har simulerats med ett plastiskt ekvivalent kontinuummaterial och

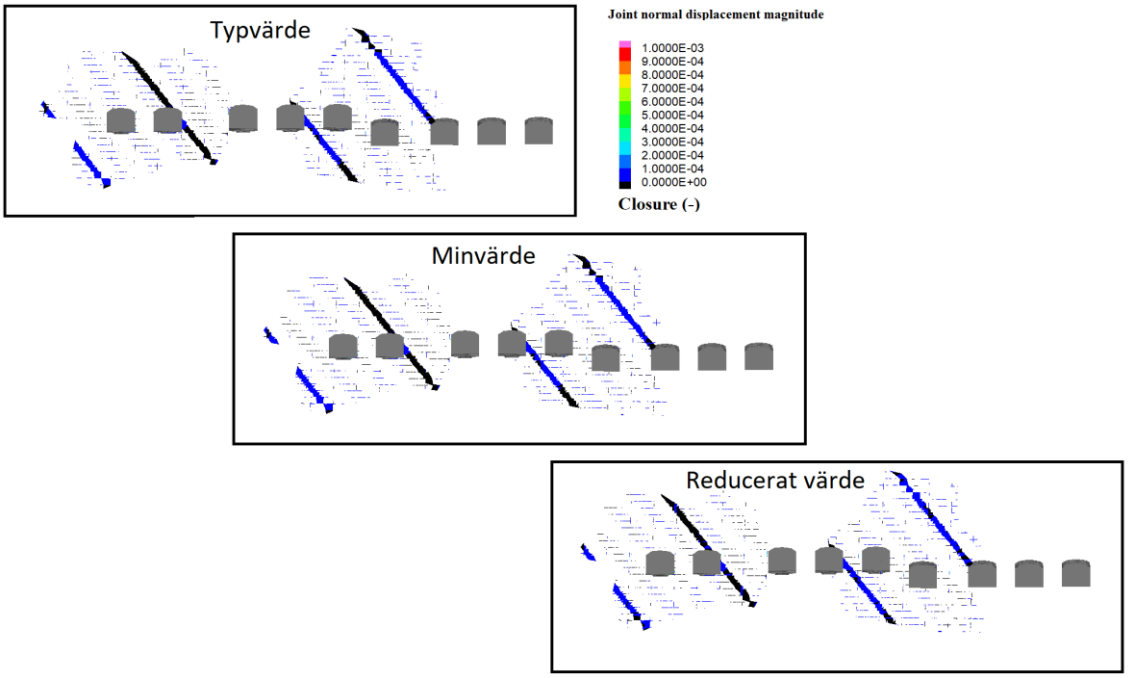
bergsprickorna simulerades som explicita plan med plastiska egenskaper. Utanför områden med sprickor inkluderade har bergmassan simulerat som ett isotropt homogent kontinuum-material. Vidare har modellen använts för att analysera generell bergmekanisk inverkan från förvarsanläggningen på flödesvägar i bergmassan samt för att studera långtidseffekter på stabiliteten och flödesvägarna under hela den tänkta förvarstiden. En sänkning av bergmassans hållfasthet över tid simulerades genom att sänka sprickornas egenskaper för att motsvara vittring av sprickorna p.g.a. kopplingen till den yttre miljön via förvarsanläggningen. I denna modell studerades också de eventuellt stabiliserande effekterna av att återfylla förvarsrummen.



Figur 7 Översikt över områden med diskontinuum (inkluderade sprickor).

Analyser av inverkan från vittring (reducerade värden) samt återfyllnadsgrad visade att skillnaden i beräkningsresultat mellan modeller med ansatta "typvärden" och ansatta "minvärden" är försumbar, medan de reducerade sprickvärdena motsvarande långt gången vittring påverkade resultaten mer. Normalrörelserna över sprickorna (spricköppning) översteg inte storleksordningen hundradels mm för något fall, se Figur 8. Spricköppningen tolkas som huvudsakligen elastisk; inga blockutfall sker. Viss glidning (tiondels mm) sker efter uttag följt av ytterligare glidning (mm-skala) på lång sikt. Det sker alltså endast marginella tillskott i separation för reducerade (långtidshållfasthet) värden men en viss ökning av skjuvrörelser (upp till ett par mm) oavsett fyllnadsgrad (resultaten från dessa visas ej här p.g.a. utrymmesskäl).

Förhållanden bedöms vara stabila även för helt tomma rum. Fyllnadsgraden har obetydlig inverkan även i fall med 95 % (högsta bedömt praktiska) återfyllnadsgrad. Detta faktum kombinerat med den signifikant lägre styvheten i fyllnadsmaterialet innebär att enbart jämförelsevis mycket små laster överförs till fyllnadsmaterialet. Stabilisering av tak och anfang sker istället genom valvverkan i bergmassan.



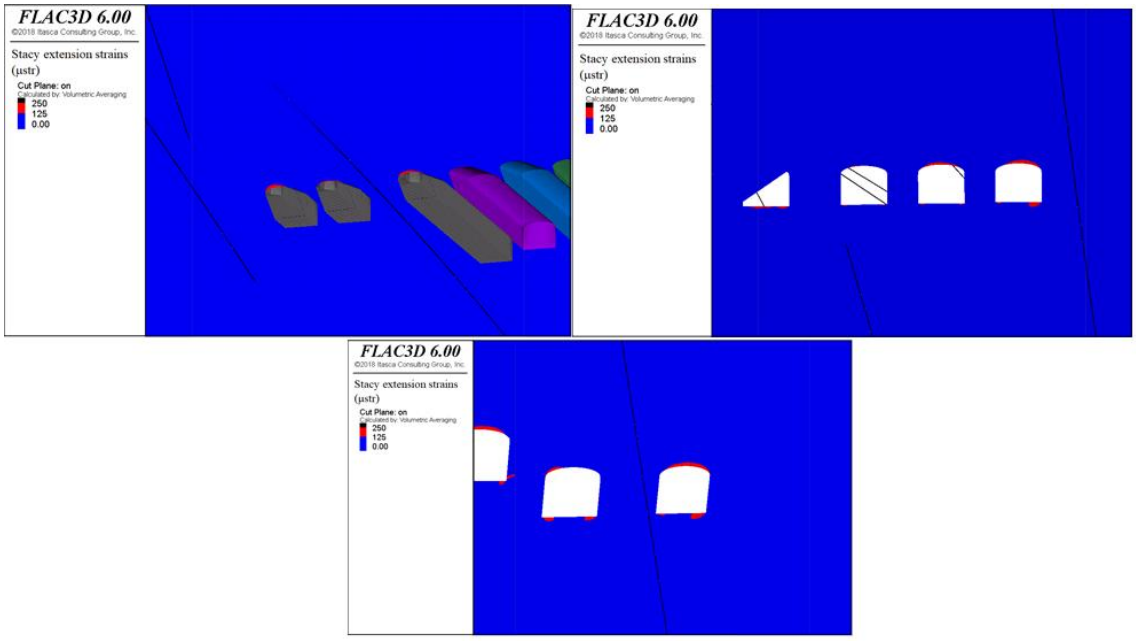
Figur 8 *Beräknade normalrörelser över sprickplan för typ-, min- och reducerade (långtidshållfasthet) värden.*

3.5 Bergmekanisk påverkan på flödesvägar

För att bedöma bergmekanisk påverkan på flödesvägar utvärderades analyserna med avseende på: (i) uppluckring/avlastning av pelare mellan bergrum, (ii) uppsprickning i anfangsnivå p.g.a. hävning av tak, (iii) påverkan mellan ramp/schakt och förvarsrum och (iv) påverkan mellan förvarsrum och närliggande borrhål.

Inspänningsförhållande och spänningsrotationer i pelare mellan bergrum studerades för att bedöma potentialen för öppning respektive stängning av sprickor. Vid fullt utbyggt förvar är kvarstående minsta huvudspänning genom pelarna låg men i huvudsak i tryck. Det finns dock en icke obetydlig potential för spricköppning av subvertikala sprickplan i pelarna. Denna potential föreligger redan under bygg- och driftskedet.

Töjningsanalyser användes för att bedöma potentialen för sammankoppling mellan förvarsområdet och objekt med bedömd högre flödespotential d.v.s. befintliga borrhål och förekommande storskaliga deformationszoner, genom bildande av nya sprickor. Vad gäller befintliga kärnborrhål så visar beräkningarna att inget av borrhålen ligger inom den påverkanszon där nybildning av sprickor kan förvänta ske (gränsvärde för spjälkning; jmf. avsnitt 3.3), se Figur 9. Sprickpåverkansområdet från uttag av förvarsrummen överlappar med positionen för en av de storskaliga deformationszonerna. Påverkan i form av förändringar i flöde kan inte kvantifieras från nuvarande analyser, men nya flödesvägar kan inte uteslutas. Vidare kan nya flödesvägar genom pelare (mellan rum) uppkomma, till följd av avlastning över subvertikala, naturliga, sprickplan i pelare.



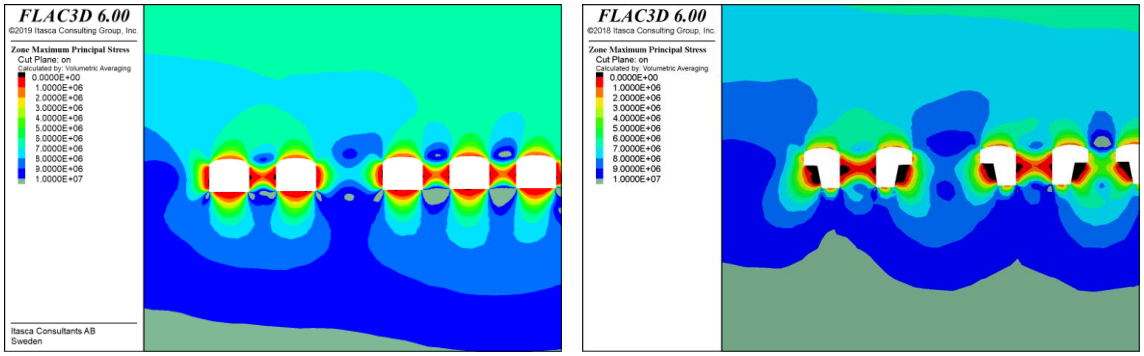
Figur 9 Beräknade töjningar runt bergrum och befintliga kärnborrhål.

3.6 Inverkan av geometriförändringar

Under projekteringsarbetet med djupförvaret har en del geometriförändringar gjorts, främst i syfte att underlätta deponering av material i bergrummen. En berghylla avses lämnas vid antingen öster eller väster vägg för att fungera som upphöjd körbana vid deponering. Vidare har anslutningsorter förändrats och även rummens exakta placering och längd har reviderats. En bergmekanisk utvärdering av dessa geometriförändringar har utförts via jämförande tredimensionella numeriska analyser. Beräkningar gjordes med kontinuum-modell och med samma materialegenskaper som i tidigare analyser.

Resultaten tyder på att den reviderade utformningen är något mindre gynnsam ur ett bergmekaniskt perspektiv jämfört med ursprunglig utformning. Dragspänningar i vägg är mer markant för fallet med berghylla. Detta innebär att hyllan inte kan räkna med någon stabiliserande effekt från normalkrafter utöver gravitativa egenlaster. Kilutfall från berghyllan är därmed sannolika om inte tillräcklig driftförstärkning appliceras. Dragspänningar utgående från rumsvägg når längre in i pelarna för reviderad utformning (Figur 10). I pelarmitt fås dock enbart tryckspänningar för samtliga tvärsektioner mellan närliggande rum, varför risken för konduktiv hopkoppling bedöms som låg.

Totaldeformationerna blir något högre för reviderad utformning men fortfarande inte större än enstaka cm. Den förändrade pelargeometrin ger inte upphov till något plastiskt flöde i bergmassan eller progressiva brott; pelarna bibehåller således den lastupptagande förmågan som krävs för att upprätthålla förvarets storskaliga stabilitet. Sammantaget bedöms att den reviderade utformningen med berghylla och rumshöjd 18 m samt rumsbredd 16 m, i stort motsvarar ursprunglig utformning vad gäller storskalig stabilitet.



Figur 10 *Beräknad minsta huvudspänning för usprunglig (vänster bild) och reviderad (höger bild) utformning för djupförvaret.*

4 MÄT- OCH UPPFÖLJNINGSPROGRAM

Ett bergmekaniskt mät- och uppföljningsprogram har tagits fram i syfte att: (i) säkerställa en säker arbetsmiljö under bygg- och driftskede av förvarsanläggningen samt (ii) validera den bergmekaniska beräkningsmodellen som ligger till grund för bergmekaniska stabilitetsberäkningar. Projektering och anläggning av förvaret bygger på observationsmetoden vilket innebär att systematiska mätningar och uppföljning är en vital del av ett säkert arbetssätt.

Eftersom små mätbara deformationer förväntas (<3 mm) förordas ett mätprogram med en kombination av extensometrar och optisk mätning med hög precision. Borrhålsextensometrar skall installeras i förvarsrum nummer 1 samt förvarsrum nummer 5. Första installation skall ske när galleripiloten nått 40–60 m in i rummet. Extensometer skall installeras i tak i vertikalt riktat hål. Den andra installationen görs när full bredd uppnåtts i rummet vid planerad mätprofil. Extensometer skall installeras i rumsvägg i horisontellt borrat hål ovanför berghyllan.

Optisk mätning skall utföras som komplement till borrhålsextensometermätningarna. En inledande nollmätning för positionen för borrhålsextensometrarnas mäthuvuden skall utföras första gången i samband med installation av extensometer. Mätning skall därefter ske under hela berguttaget från rummet. Optisk mätning skall utföras med totalstation enligt fackverksprincip eller motsvarande teknik med en noggrannhet på 1 mm eller bättre. Mätnoggrannheten skall verifieras i samband med nollinmätning; förslagsvis genom att utföra en dubbelmätning inkluderande ometablering vid ett tillfälle.

Geomekanisk kartering av samtliga salvor och strossar skall utföras på exponerade bergytor innan sprutbetong påförs. Karteringen skall inkludera *Q*-värde inklusive delparametrar, *GSI*-bedömning, bergartsuppskattning samt orientering och position för bergsprickor med skönjbar längd överstigande 2 m för kloritiska sprickplan eller bergsprickor som helt skär bergsutrymmet d.v.s. är kontinuerligt skönjbara i båda väggar eller i vägg och tak.

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

De utförda analyserna bedöms generellt sett ge en representativ och tillförlitlig bild av de bergmekaniska förhållandena för djupförvaret. De förenklingar som gjorts har haft som mål att producera resultat som är konservativa. Ett exempel är antagandet av oändliga sprickl ängder relativt tunnelskala vilket ger ett konservativt fall gällande både storlek och antal av uppkomna block. Det är dock möjligt att sprickpåverkan sker i områden utanför de som simulerats i modellen, men eftersom resultaten visar på mycket små sprickrörelser även i direkt anslutning till förvarsrummen, kan det dock inte förväntas att påverkan utanför de undersökta områdena är signifikant.

Bergmassans egenskaper har uppskattats från rampkartering och bergmekanisk kartering av kärnborrhål. Materialet är relativt begränsat sett till den stora volym som omfattas av djupförvaret. Kompletterande kartering under byggskedet är därför viktig för att verifiera antagna bergkvaliteter. Effekten av långtidspåverkan på bergmassans egenskaper är svår att uppskatta. De beräkningar som gjorts visar dock på små effekter även då egenskaperna för sprickor reducerats kraftigt i syfte att simulera hållfasthetsnedsättning under lång tid.

Förstärkningsåtgärder i form av sprutbetong och bergbult får inte tillgodoräknas för förvarets långtidsstabilitet. Beräkningarna visade dock att förvarsanläggningen väntas vara storskaligt stabil även i frånvaro av sådana förstärkningssystem. Detta innebär dock inte att bergförstärkning kan uteslutas eftersom lokal instabilitet p.g.a. variationer i bergkvalitet och strukturorienteringar sannolikt uppkommer. Förstärkning bör alltså utföras ur arbetsmiljösynpunkt för att fungera under bygg- och driftskede.

Fyllnadsgraden i deponeringsrummen har liten inverkan på den storskaliga långtidsstabiliteten. Den antagna styvheten för återfyllnadsmaterialet är sannolikt högre än den för den faktiska återfyllnaden, åtminstone vad avser det deponerade avfallet. Detta innebär att den återfyllnad som kommer att användas sannolikt har en lägre inverkan på bergmassan än den simulerade. Lokalt kan dock en hög fyllnadsgrad bidra till att stabilisera enskilda block (kilar) varför en så hög fyllnadsgrad som möjligt ändå förordas för att säkra integriteten i förvaret, och minska potentialen för öppnande av flödesvägar, för dess hela drifttid.

Sammanfattningsvis kan följande slutsatser dras:

– Påverkan på markytan (deformationer) till följd av förvarsbygget bedöms vara mycket liten – mindre än 10% av allmänt accepterade villkor för markpåverkan på infrastruktur.

– Bergmekanisk påverkan på pelare (möjlig uppsprickning / spjälkning) bedöms vara liten. Inget av närliggande borrhål ligger i potentiellt påverkansområde för uppsprickning / spjälkning. Ingen påverkan på rampen förväntas heller från utbyggnaden av förvaret. Ingen påverkan av flödesvägar förväntas därför för dessa delar. Avlastning och dragspänning i pelare kan dock ge ett potentiellt ökat flöde.

– Förvarets placering och utformning är generellt sett gynnsam ur ett bergmekaniskt perspektiv. Resultaten visade på låg sannolikhet för hydraulisk koppling mellan förvarsrum och existerande borrhål eller ramp. Förvarsutformningen bedöms som storskaligt stabil även bergförstärkningens och oavsett fyllnadsgrad. Förstärkningsåtgärder krävs dock för att säkra lokal stabilitet under bygg- och driftskedet av förvaret.

6 REKOMMENDATIONER

– Försiktigt berguttag bör utföras för att undvika skador på bergpelare samt minimera påverkanszon (EDZ) runt tunnelkontur.

– Förstärkning under bygg- och driftskede bör utföras från ett arbetsmiljö-perspektiv, men med hänsyn till potentiell långsiktig inverkan på flödesvägar. Genomborrning av bergmassan bör minimeras, framförallt i pelarna.

– Bergmekanisk kartering av exponerade bergytor bör utföras under byggtiden och deformationer bör övervakas med extensometrar kombinerat med optisk mätning. Uppmätta värden bör jämföras mot resultat från de numeriska beräkningarna för att identifiera oväntade beteenden eller bergegenskaper som avviker från de förväntade.

ERKÄNNANDE OCH TACK

Vi vill rikta ett stort tack till Boliden Mineral AB som medgivit publicering och presentation av detta arbete.

REFERENSER

Hakala, M. 2018. *In Situ Stress Measurement with LVDT-cell in Boliden Rönnskär at 295 m level.* Tampere, Finland: Stress Measurement Company Oy.

Itasca. 2018a. ***FLAC3D Version 6.0.*** Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc.

Itasca. 2018b. ***3DEC Version 5.2***. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc.

Martin, C., & Chandler, N. A. 1994. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 31*, 643–659.

Sjöberg, J., Stöckel, B.-M., Mäkitaavola, K., & Savilahti, T. 2011. Bergmekanisk omgivningspåverkan i stor skala – gruvinducerade markdeformationer i Kiruna och Malmberget. ***Bergmekanikdag 2011 – Föredrag*** (Stockholm, March 14, 2011), s. 29–40, Stockholm: BeFo.

Stacey, T. 1981. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock. Int. J. *Roc. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, ***Vol 18***, pp. 469-474.