

# **BERGSPÄNNINGSMÄTNINGAR I LKAB:S MALMBERGSGRUVA**

## **Stress measurements in LKAB Malmberget mine**

*Thomas Wettainen, LKAB*

*Kristina Jonsson, LKAB*

### **SAMMANFATTNING**

LKABs gruva i Malmberget är en av världens största underjordsgruvor och producerar årligen omkring 16 Mton järnmalm. Nuvarande huvudnivå ligger på 1250 meters avvägning och undersökningar pågår inför eventuell fortsatt avsänkning. I samband med detta har bergspänningsmätningar i fyra borrhål mot djupet genomförts med hydrauliska metoder. I tillägg har även mätningar med överborrning av LVDT-cell gjorts i anslutning till aktiva brytningsområden. Resultaten indikerar att spänningsfältet i Malmberget är komplext och varierande. Den ofta antagna hypotesen om sub-linjära spänningsgradienter mot djupet kan inte påvisas. För Malmbergets del är detta faktum inte förvånande då hela gruvområdet är kraftigt geologiskt deformerat och veckat vilket även resulterat i bildandet av de tjugotal malmkropparna som utgör grunden för LKABs verksamhet på orten. Spänningsmätningar på stora djup medför också problem i form av borrhålsinstabilitet vilket försvårar arbetet och introducerar osäkerheter i slutresultatet. Mätningarna har dock använts för att konstruera ett generellt primärspänningssamband vilket kan utnyttjas som indata vid numeriska analyser. Kompletterande spänningsmätningar har även gjorts på mindre djup. I anslutning till malmkroppen Printzsköld finns ett underjordiskt hålrum som successivt växer upp mot markytan. Denna process genererar seismiska händelser som kan medföra höga markvibrationer i samhället. Bergspänningsmätningar i den så kallade takskivan ovanför hålrummet har gjorts i syfte att bestämma det lokala spänningsfältet och kunna vidta åtgärder för att minimera störningar för närboende.

## ABSTRACT

The LKAB mine in Malmberget in northern Sweden is one of the world's largest underground mines with an annual production of around 16 Mtons iron ore. The current main level is located on 1250 m and investigations for potential continued mining at depth are ongoing. For this reason, stress measurement in four drill holes using hydraulic methods have been performed. In addition, stress evaluations from overcoring of LVDT cell close to active mining levels has been done. The obtained results indicate that the stress field in Malmberget is heterogeneous and complicated. The often assumed hypothesis of sub-linear stress gradients towards depth cannot be confirmed. This is however not surprising since the whole mining area has been extensively geologically deformed and folded, a process which has created more than 20 orebodies. Stress measurements at depth are also associated with difficulties caused by borehole instability which complicates data interpretation. The measurements have still been used to construct an in-situ stress relationship which can be used as input for numerical analyses. Additional stress measurements have also been done at more shallow depth. Close to the Printzsköld orebody there is an underground void that gradually caves up towards the ground surface. This process generates seismic events that cause high vibrations in the town of Malmberget. Stress measurements in the cap rock have been performed in order to determine the local stress field and plan for actions that serve to reduce disturbances to nearby residents.

## LKAB MALMBERGET

Samhället Malmberget med tillhörande underjordsgruva (Figur 1) är beläget i norra Lappland, cirka 70 kilometer norr om polcirkeln.



Figur 1 Flygfoto över Malmberget och gruvområdet. *Aerial view of Malmberget and the mine.*

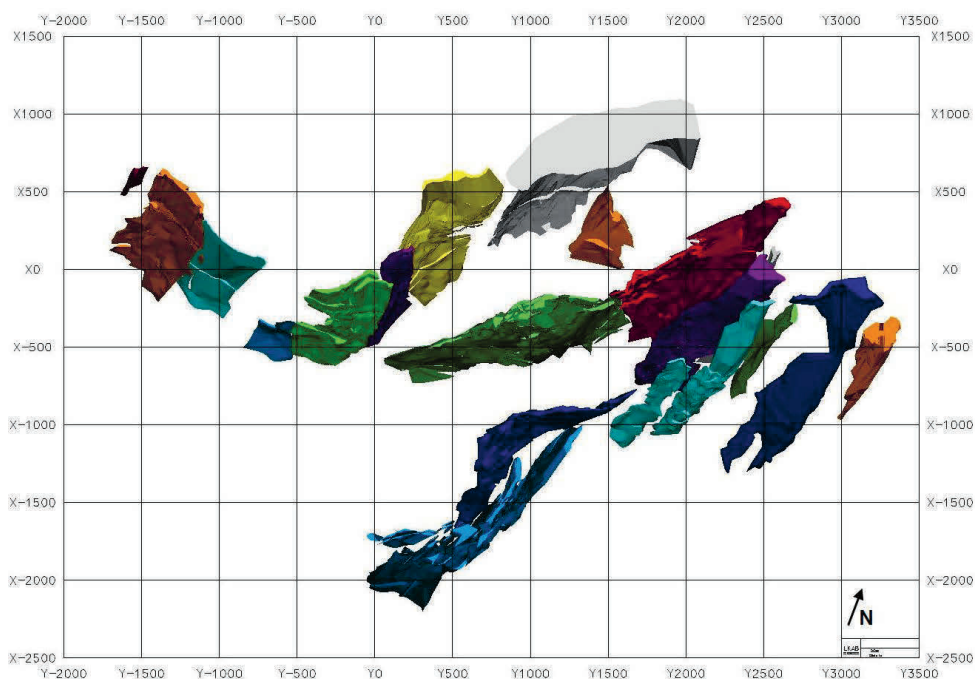
Mineraliseringarna i området har varit kända i århundraden och malm transporterades ursprungligen från gruvan med hästar och renar. 1888 blev järnvägen till Luleå färdigställd och storskalig brytning startade. Fortfarande idag transporteras merparten av de raffinerade järnmalmprodukterna från Malmbergsgruvan till Luleå för användning vid SSABs stålverk eller för vidare utskeppning inom Östersjöregionen.

Gruvbrytningen startade i dagbrott men redan på 1920-talet bedrevs all brytning under jord. Produktionen 2016 var cirka 16 Mton råmalm från 14 malmkroppar på ett maximalt djup av omkring 900 m under markytan. Det huvudsakliga mineralet är magnetit men mindre mängder hematit bryts också. Gruvan ägs och drivs av statliga Luossavaara-Kiirunavaara AB (LKAB). Flertalet malmkroppar lutar in under Malmberget vilket medför att brytningsområdena successivt kommer närmare bebyggelsen och en omlokalisering av samhället har pågått sedan 1960-talet.

Gruvan består av omkring 20 malmkroppar av varierande storlek och form utspridda över ett område om 5 x 3 km, se Figur 2. Området är påtagligt geologiskt deformerat och flertalet malmkroppar ligger i eller i anslutning till veckomböjningar.

Malmkropparna bryts på olika djup vilket också bidrar till att skapa ett komplicerat

spänningsfält. Huvuddelen av malmen bryts mot en huvudnivå på 1250 m. Enligt nuvarande produktionsplan kommer brytningen att nå denna omkring år 2032.

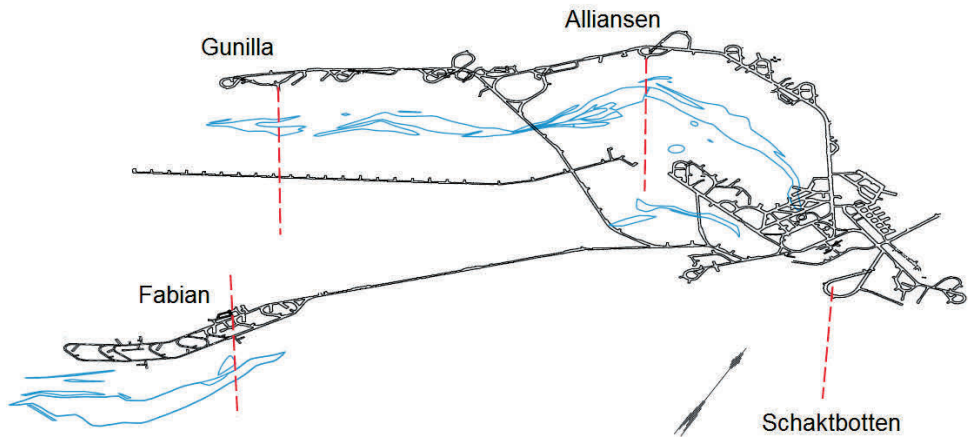


Figur 2 Malmkroppar i Malmberget, horisontalvy, meterskala. *Ore bodies in Malmberget, horizontal view, metric scale.*

## HYDRAULISK SPRÄCKNING

Möjligheter till fortsatt brytning under huvudnivå 1250 utreds för närvarande. Som ett led i detta arbete gjordes ett antal bergspänningsmätningar mot djupet under år 2014. Metoden som valdes var hydraulisk spräckning, främst på grund av tidigare erfarenheter av detta i Malmbergsgruvan. Pöry Swedpower (Ask, 2015) anlätades för arbetet.

Mätningar gjordes i fyra 400-500 m långa sub-vertikala borrhål med dimensionen 76 mm. Generellt utförs bergspänningsmätningar i nära vertikala borrhål eftersom hållriktningen då ofta sammanfaller med en huvudspänningsriktning, nämligen vertikalspänningen. Figur 3 visar borrhålens läge i förhållande till huvudnivå 1250 samt malmgränserna på samma nivå. Hålen är borrarade från de djupast belägna områdena i respektive del av gruvan vid tillfället vilket reducerar påverkan på resultaten från brytningen. Påhuggen är belägna mellan 735 och 1215 m under markytan.

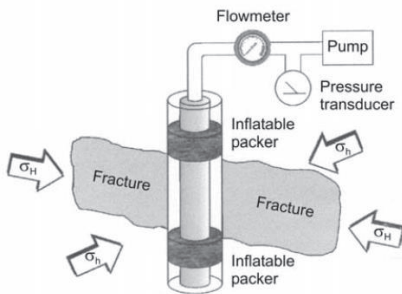


Figur 3 Huvudnivå 1250 m med tillhörande malmgeometri (blått) och borrhål för bergspänningsmätningar (rött), isometrisk vy. *Main level 1250 m with ore geometry (blue) and drill holes for stress measurements (red), isometric view.*

Borrhålsutrustningen inkluderade två gummimanschetter, så kallade packrar, med maximalt arbetstryck om 650 bar. Packerlängden var 1,2 m och testsektionen mellan dem 1,0 m. Borrhålsutrustningen firas ned i borrhålet till önskad position med en vinsch och vatten pumpas till packrar samt testsektion oberoende av varandra genom tunna ståltuber via en kontrollpanel. För- och efterloggning av borrhålen gjordes med hjälp av akustisk televiwer vilket ger information om anomalier som har en akustisk kontrast i borrhålsväggen. Förloggning är nödvändig för att kunna välja lämpliga testsektioner. Efterloggning görs i syfte att detektera inducerade sprickor för fortsatt analys och tolkning av spänningsfältet. I tillägg till televiwer användes en Gamma Ray-sond för ökad precision i positioneringen av borrhålsutrustningen. Sonden mäter den naturliga radioaktiviteten längs borrhålet med stor noggrannhet och repeterbarhet.

#### *Metodbeskrivning Hydraulisk spräckning (HF)*

Utrymmet mellan packrarna trycksätts så att borrhålsväggen går i dragbrott. Om sprickan som bildas är axiell fastställs först att en huvudspänning är vertikal och att de två övriga ligger i horisontalplanet. Sprickans plan anger riktningen för största horisontalspänning och därmed kan riktningen för minsta horisontalspänning också fastställas, se Figur 4. Magnitud för minsta horisontalspänning kan beräknas utifrån



Figur 4      Principskiss hydraulisk spräckning, från Larsen & Hagen (2016). *Hydraulic fracturing principle.*

den skapade spräckans stängningstryck vilket motsvarar normalspänningen på sprickytan. Magnitud för största horisontalspänning kan sedan beräknas om bergets draghållfasthet antas vara känd, alternativt kan spräckans återöppningstryck användas. En tolkning av bägge horisontalspänningskomponenterna med tillhörande riktning enbart utifrån HF förutsätter således att en axiell spricka bildas. Ingen information om vertikalspänningens faktiska magnitud erhålls då utan den antas vanligen vara gravitativ.

#### *Metodbeskrivning Membranspräckning (SF)*

Spräckning av berget kan även ske med packrarna utan att introducera vatten i testsektionen och därmed inte heller i de bildade spräckorna. Vid membranspräckning erhålls spräcktryck och återöppningstryck som är mindre påverkat av portryckseffekter. Skillnaden mellan spräck- och återöppningstryck motsvarar bergets draghållfasthet. Därmed kan en förbättrad uppskattning av magnituden på största horisontalspänningen göras jämfört med enbart HF i de fall då draghållfastheten används som ingående parameter.

#### *Metodbeskrivning Hydrauliska tester på befintliga sprickor (HTPF)*

Genom att försiktigt återöppna befintliga sprickor utan att orsaka vidare propagering kan magnituden på vertikalspänningen bestämmas, dessutom erhålls en oberoende bestämning av största huvudspänningen. Metoden erbjuder således även ett sätt att verifiera resultat från de två övriga spräckningsmetoderna. HTPF kan tillämpas på sprickor med godtycklig riktning. Tolkningen av HTPF-data utförs med numerisk inversion baserad på minsta kvadratmetoden med djup, sprickplanets azimut, dip från vertikalen samt normalspänningen över sprickplanet som ingående parametrar.

### *Begränsande faktorer vid utförandet*

#### Ras i borrhål

Av olika anledningar dröjde det upp till ett år mellan borring av hålen och bergspänningsmätningarna. Vid förloggningen visade det sig att två av hålen hade rasat ihop. Detta kan dock ha skett direkt efter borring och behöver inte nödvändigtvis ha med väntetiden att göra. Försök gjorde att öppna hålen med hjälp av en tung dummysond som släpptes på de raserade sektionerna i hålen. I ett av hålen lyckades försöket medan det andra förblev blockerat vid 150 m.

#### Svarvning av borrhål

Detta är ett fenomen som ger en korkskruvsformad fördjupning i borrhålväggen i samband med borringen. Orsaken är främst relaterad till matnings- och spolvattentryck under borring samt konditionen på kärnrörets övre och undre kaliberring vilket kan försämra styrningen. Detta medför att packerelementen inte sluter tätt mot borrhålväggen. För lyckade injektionstester krävs att förseglingen av testsektionen är optimal. Ett litet läckage nedåt förbi det undre packerelementet kan dessutom bygga upp ett tryck som slutligen skjuter hela borrhålsutrusningen uppåt i hålet med stor kraft.

#### Kronvässning

Vid kronvässning stängs spolvattnet av under en kort period med bibehållen matning och rotation. Resultatet är en kraftig värmeutveckling som smälter kronans matrix vilket ger en momentant tjockare kronyta. Samtidigt friläggs nya diamanter i matrixen och den fortsatta borringen underlättas. Den förtjockade kronytan nöter en kort stund på borrhålväggen innan den slipas ned och ger upphov till fördjupningar som är synbara på televideodata. Spår efter kronvässning utgör en försvagning i borrhålväggen och därmed en naturlig initieringspunkt för en spricka vid injektionstester. Dessa spår är därför inte önskvärda men förekom i anmärkningsvärd mängd i borrhålen. Det är sannolikt en följd av spänningsinducerade utfall i hålen vilket under borringen felaktigt tolkats som problem med kronans skärande förmåga.

#### Elektriska störningar

Vid mätningarna utnyttjades gruvans eget elförsörjningssystem i kombination med en skyddstransformator. Trots det plockades störningar i elförsörjning ändå upp av det analoga datasystemet och resulterade i mer eller mindre betydande brus som försvårade datatolkningen. I vissa fall krävdes specialskrivna brusreduceringsalgoritmer för att bemästra problematiken.



## *Tolkning av spänningsfält*

### Spänningsinducerade utfall

Spänningsinducerade utfall i borrhål uppstår när spänningskoncentrationen överstiger bergets hållfasthet. Utfallen är parallella med minsta huvudspänningen i planet vinkelrätt borrhålsaxeln och bildas på diametralt skilda sidor om borrhålet. Teorin är baserad på Kirsch lag (Kirsch, 1898). Samtliga fyra borrhål har gått i brott i varierande grad och utifrån analys av utfallens geometri kan spänningarnas riktning bestämmas, men utfallen reducerar även antalet tillgängliga testsektioner för hydraulisk spräckning. Utfallen indikerar att spänningsriktningarna inte är konstanta mellan hålen och att rotation med djupet kan förekomma. Det framgick att minsta horisontalspänning, som därmed också enligt teorin är minsta horisontella huvudspänning, ligger i intervallet 200-250° relativt gruvans lokala norr. Detta ger då att största spänningsriktning återfinns i intervallet 110-160°.

### Analytiska beräkningar

Resultat från Hydraulisk spräckning (HF) samt Membranspräckning (SF) användes för analytiska beräkningar. I tre av fyra borrhål kunde största – och minsta horisontalspänning med tillhörande riktningar bestämmas. I det fjärde (Alliansenhålet) erhöles endast sub-horisontella sprickor och ingen analytisk beräkning gjordes.

### Numeriska beräkningar

Genom numerisk inversion kan även data från HTPF-tester användas och ett värde på vertikalspänningen erhållas. Inledningsvis gjordes beräkningsförsök med enbart data från spräckningarna. Det visade sig dock att beräkningarna behövdes styras med hjälp av kända randbetingelser. Dessa är exempelvis orientering och/eller magnitud för en spänningskomponent. Samtliga spänningskomponenter kunde bestämmas i tre borrhål, dock över begränsade sektioner. I Alliansenhålet kunde endast största horisontalspänningens riktning samt vertikalspänningens magnitud bestämmas.

## *Resultat*

Nedan visas de sektioner och borrhål där samtliga spänningskomponenter kunde bestämmas,  $z$  = gruvnivå. Markytan ligger 80-240 m under gruvans nollpunkt ( $z = 0$  m). Samtliga spänningsriktningar anges relativt gruvans lokala norr.

Fabian:  $1265 \leq z \leq 1465$  m, cirka 40 % av borrhålslängen

$$\sigma_H = 55,7 + 0,0072 \cdot (z - 1265) \text{ MPa}$$

$$\sigma_h = 26,4 + 0,0151 \cdot (z - 1265) \text{ MPa}$$

$$\sigma_v = 20,0 + 0,0328 \cdot (z - 1265) \text{ MPa}$$

riktning 155°



Gunilla:  $1260 \leq z \leq 1460$  m, cirka 40 % av borrhålslängen

$$\begin{aligned}\sigma_H &= 75,6 + 0,0159 \cdot (z - 1260) \text{ MPa} && \text{riktning } 140^\circ \\ \sigma_h &= 37,7 + 0,0247 \cdot (z - 1260) \text{ MPa} \\ \sigma_v &= 16,6 + 0,0130 \cdot (z - 1260) \text{ MPa}\end{aligned}$$

Schaktbotten:  $1410 \leq z \leq 1640$  m, cirka 60 % av borrhålslängen

$$\begin{aligned}\sigma_H &= 73,7 + 0,0289 \cdot (z - 1410) \text{ MPa} && \text{riktning } 120^\circ \\ \sigma_h &= 39,2 + 0,0027 \cdot (z - 1410) \text{ MPa} \\ \sigma_v &= 23,6 + 0,0414 \cdot (z - 1410) \text{ MPa}\end{aligned}$$

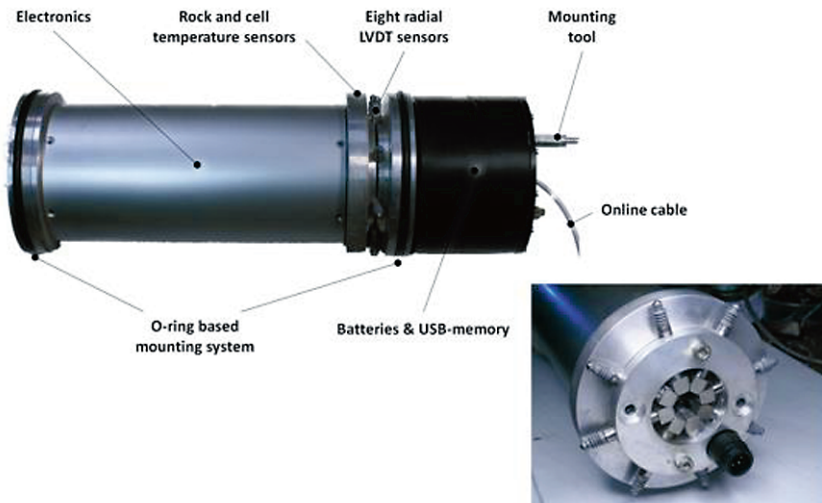
Både spänningsmagnituder och riktningar varierar mellan hålen vilket indikerar att spänningsfältet är heterogent. I samtliga fall är vertikalspänningen lägst och understiger kraftigt en teoretisk spänning orsakad av ovanliggande berg. Det är troligt att Malmbergets komplexa geologi i kombination med gruvbrytningen orsakar dessa förhållanden, trots att spänningsmätningarna gjordes många hundra meter under närmaste brytningsområde.

## ÖVERBORRNING AV LVDT-CELL

I gruvan transporteras malm från produktionsnivåerna till huvudnivån genom subvertikala schakt kallade bergstigar. I malmkroppen Dennewitz fick en ny bergstig år 2013 stängas kort efter drifttagandet på grund av omfattande seismisk aktivitet i samband med lastning i stigen. Bergspänningsmätningar gjordes därefter i anslutning till bergstigen på nivå 1056 m vilket motsvarar omkring 950 m under markytan.

### *Metodbeskrivning*

Metoden som valdes var överborrning av LVDT-cell (Linear Variable Differential Transformer), se Figur 5. Arbetet genomfördes av Stress Measurement Company OY (Hakala & Heine, 2014).



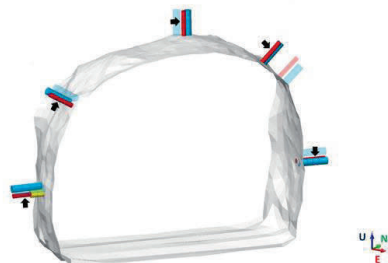
Figur 5 LVDT-cell, från Hakala & Heine (2014).

Cellen installeras i ett 126 mm pilothål strax bortanför ortväggens skadezon och mäter fyra diametrala deformationer vid efterföljande överborrning.

Överborrning görs företrädesvis av hela cellen, men vid höga spänningar och tillhörande core discing kan istället ett eller två hål borraras vid sidan av cellen. I bägge fall blir cellen helt eller delvis avlastad från omgivande spänningar och deformationer registreras av mätkomponenterna.

Numerisk modellering och inversion används sedan för att beräkna spänningstillståndet baserat på uppmätta deformationer, omgivande ortgeometri samt bergmassans elastiska egenskaper. De elastiska parametrarna bestämdes inledningsvis med en bi-axialcell men då värdena blev betydligt lägre än förväntat för bergarten ifråga så gjordes enaxiella trycktest istället. Fullständig överborrning provades men lyckades

inte på grund av spänningssituationen. Istället tillämpade enkel eller dubbel sidoborrning. Mätningar gjordes i sex lägen längs ortens tvärsektion, se Figur 6.



Figur 6 Ortprofil med pilothål (rött), överborrningsförsök (gult) och sidoborrning (blått), från Hakala & Heine (2014). *Cross section with pilot holes (red), overcoring attempt (yellow) and side coring (blue).*

## Resultat

De elastiska konstanterna har stor inverkan på beräkningsresultatet. Elasticitetsmodul 62,7 GPa och tvärkontraktionstal 0,27 vilka motsvarar medelvärden av tre testade borrhärdor under 80-100 MPa axiell belastning bedömdes vara mest representativa. Den numeriska inversionen gav följande spänningar:

$$\begin{aligned}\sigma_H &= 67 \text{ MPa} && \text{riktning } 138^\circ \text{ relativt gruvans lokala norr} \\ \sigma_h &= 36 \text{ MPa} \\ \sigma_v &= 17 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Det kan konstateras att även vid dessa mätningar är vertikalspänningen betydligt lägre än vikten av ovanliggande berg. Det förklaras sannolikt med att spänningsfältet vid mätplatsen var markant påverkat av omgivande brytning. Närmaste brytningsområde var beläget omkring 70 meter ovanför. Malmkroppen Dennewitz ligger dessutom mitt i malmfältet omgiven av andra malmkroppar där brytning pågår.

## KALIBRERING AV SPÄNNINGSMODELL

Resultaten från hydraulisk spräckning samt överborrning med LVDT-cell har tillsammans med äldre mätdata använts av Itasca Consultants för att kalibrera en global spänningssamband för numeriska analyser (Perman m fl., 2016). Modellen innehåller ett stort antal brytningssteg för att kunna efterlikna verkligt produktionsläge. Kalibrering har skett mot det brytningssteg som motsvarar brytningsläget vid respektive spänningsmätning. Metodiken finns beskriven i McKinnon (2001) och bygger på att minimera skillnaderna mellan uppmätta spänningar och erhållna modellerade spänningar i respektive mätpunkt. Följande spänningssamband erhöles:

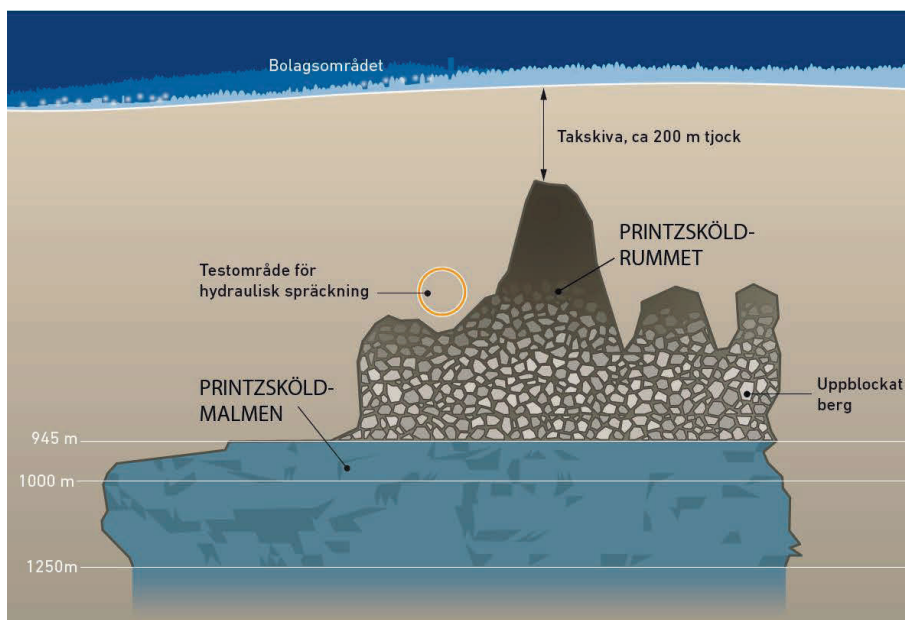
$$\begin{aligned}\sigma_H &= 0,0396z \text{ MPa} && \text{riktning } 132^\circ \text{ relativt gruvans lokala norr} \\ \sigma_h &= 0,0161z \text{ MPa} \\ \sigma_v &= \rho gh / 10^6 \text{ } (\sim 0,0265z) \text{ MPa}\end{aligned}$$

$z$  = gruvnivå,  $h$  = djup under markyta

Vid kalibreringen har förutsatts att den primära, av gruvbrytningen ostörda, vertikalspänningen är gravitativ. Utifrån resultaten av genomförda bergspänningsmätningar råder dock viss osäkerhet om så verkligen är fallet. Det kan också diskuteras om ett generellt spänningssamband för Malmberget är tillämpbart eller om indelning i områden och/eller nivåer bör göras.

## SPÄNNINGSMÄTNING FRÅN MARKYTAN

I maj 2016 genomförde SINTEF bergspänningsmätningar för LKABs räkning i ett borrhål från markytan ovanför malmkroppen Printzsköld. Mätningarna utfördes som en del i ett forskningsprojekt som utvärderar hydraulisk spräckning som en möjlig metod för att påverka uppblockningshastigheten i takskivan, se Figur 7. Syftet var att bestämma spänningarnas riktning och storlek för att kunna bedöma vilken sprickriktning och spräcktryck som behövs för att initiera sprickor i takskivan.



Figur 7 Malmkroppen Printzsköld med hålrum och uppblockat berg samt testområdet där bergspänningsmätningar gjordes, vertikalvy mot norr.  
*Printzsköld orebody with cavities, caved rock and area for stress measurements, vertical view towards north.*

Sex lyckade mätningar genomfördes på ca 300 m djup under markytan. Resultaten från mätningarna visar att största horisontalspänningen  $\sigma_H$  är 23,7 MPa och minsta horisontalspänningen  $\sigma_h$  är 12,5 MPa (Larsen & Hagen, 2016). Dessa värden är ungefär dubbelt så höga som det tidigare nämnda spänningssambandet för Malmberget ger. Det kan finnas flera orsaker till skillnaderna. Dels är spänningssambandet framtaget baserat på mätningar på större djup, dels kan mätresultat påverkas av lokal geologi. Spänningsfältet på mätplatsen kan också vara påverkat av hålrum orsakade av brytningen som finns i närheten. Största horisontalspänningens orientering bestämdes till 120° relativt gruvans lokala norr vilket i stort överensstämmer med mätningarna på

större djup. Eftersom enbart hydraulisk spräckning (HF) gjordes och sub-vertikala sprickor erhöles finns ingen data för bestämning av vertikalspänningen i takskivan. Förloggning med optisk televiewer gjordes och användes tillsammans med borrhärnan för att bestämma lämpliga testsektioner. Efterloggning gjordes däremot inte i denna mätkampanj. Utvärdering av erhållna sprickor efter spräckningen gjordes med hjälp av en så kallad *impression packer* som har en mjuk gummiyta där avtryck från sprickor i borrhållsväggen avläses.

## REFERENSER

- Ask, D. 2016. Hydrauliska bergspänningsmätningar i Malmberget. Pöyry Swedpower AB. LKAB-utredning 16-854E.
- Hakala, M. & Heine, J. 2014. Stress measurements with LVDT cell Dennewitz 1056. Stress Measurement Company OY. LKAB-utredning 14-850E.
- Kirsch, G. 1898. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. Zeit Ver. Dt. Ingenieure, 42, p. 797-807.
- Larsen, T. E. & Hagen, S. A. 2016. Rapport Hydraulisk splitting ved LKAB, Malmberget. SINTEF. Bilaga C till LKAB-utredning 17-721: Förstudie – Återupptagen produktion Printzsköld.
- McKinnon, S. D. 2001. Analysis of stress measurements using a numerical model methodology. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 38: 699–709.
- Perman, F., Wettainen, T., Gonzalo, C. & Sjöberg, J. 2016. Three-dimensional modeling and stress calibration for a complex mining geometry. In: Proceedings RS2016, 7th International Symposium on In-Situ Rock Stress (Tampere, Finland, May 10-12, 2016), pp. 127–138. ISBN 978-951-758-606-1.