



PARTNER:



## VÄLKOMMEN TILL DEN 52:a BERGMEKANIKDAGEN 20 MARS 2018

Bergmekanikdagen anordnas i år av Svenska Bergteknikföreningen i samarbete med Svenska Bergmekanikgruppen.



### PROGRAM

(cirkatider, med reservation för ändringar)

08:30 REGISTRERING – Kaffe & Smörgås

09:00 **Hälsningsanförande**

*Per Tengborg, BeFo*

09:20 **Gästföreläsning**

- Dealing with uncertainty and risk in rock engineering design  
*William Joughin, SRK Consulting*

10:00 **Session 1: DIMENSIONERING**

*Moderator: Jonny Sjöberg, Itasca*

- Verifiering av livslängden för bergtunnlar  
*Per Vedin, Beatrice Lindström, Erik Stål*

10:25 KAFFE I UTSTÄLLNINGEN

11:05 **Session 1: DIMENSIONERING fortsättning**

- 3D-analys av station Korsvägen – effekt av förstärkning vid svåra förhållanden  
*Axel Bolin, Diego Lope Álvarez, Louise Jakobsson, Jonny Sjöberg*
- Passage under Lövstavägen vid Förbifart Stockholm - från design till realisering  
*Mattias Roslin, Jan Vesely, Per Salomonson*
- Aktiv design - förstärkning och tätning av berg - tpl Hjulsta Förbifart Stockholm  
*Johanna Holmsten, Cecilia Montelius, Lars-Olof Dahlström*

12:05 MINGEL-LUNCH I UTSTÄLLNINGEN

13:05 **Session 2: BEFO-MEDLEY**

*Moderator: Catrin Edelbro, Itasca*

*Kortpresentationer av utvalda forskningsprojekt*

13:45 **Presentation och utdelning av pris: Bästa examensarbete**

14:00 **Session 3: INJEKTERING**

*Moderator: Ann Emmelin, Golder Associates*

- Erosion av injekteringsmedel - kan det vara ett problem?  
*Johan Funehag, Thomas Janson*
- Injekteringsmodellering av vattenfyllda bergsprickor med varierande apertur  
*Liangchao Zou, Ulf Håkansson, Vladimir Cvetkovic*

- Nya framsteg i mätning av inträngningsförmåga av injekteringsmedel, förbättring av spridning av bruket och utvärdering av RTGC-teorin  
*Ali Nejad Ghafar, Almir Draganovic, Fredrik Johansson, Stefan Larsson*

## 15:00 KAFFE I UTSTÄLLNINGEN

### 15:30 Session 4: GRUVA

*Moderator: Thomas Wettainen, LKAB*

- Prognosverktyg för infrastrukturskador i Kirunagruvans liggvägg  
*Mikael Svartsjaern, Karola Mäkitaavola*
- Försök med hydraulisk spräckning i LKABs gruvor i Kiruna och Malmberget  
*Kristina Jonsson, Patricia Klara Boeg-Jensen*
- Radar för släntövervakning  
*Mats Larsson, Anton Bergman, Jansiri Ekaram Malmgren, Hannington Mwagalanyi*
- Att lyssna till vad bergmassan säger  
*Jessa Vatcher, SD McKinnon, Jonny Sjöberg*
- Numeriska analyser av storskaliga dynamiska tester av bergförstärkning i LKABs Kiirunavaaragruva  
*Shahin Shirzadegan, Erling Nordlund, Ping Zhang, Changping Yi*

## 17:15 VAL AV BÄSTA FÖREDRAG

## 17:20 AVSLUTNING

## 17:25 ÅRSMÖTE – SVENSKA BERGMEKNIKGRUPPEN

## 17:20 MINGELBUFFÉ I RIDDARSALEN

*Mingelsponsor: EPC Scandinavia*



**Elasto Plastic Concrete**  
The Synthetic Fibre Experts

Session 1: DIMENSIONERING

## VERIFIERING AV LIVSLÄNGDEN FÖR BERGTUNNLAR

*Per Vedin, Trafikverket*

*Beatrice Lindström, Trafikverket*

*Erik Stål, Trafikverket*

Idag äger Trafikverket ett 15-tal järnvägstunnlar som har en ålder på över 100 år, flera är äldre än 120 år. När vi dimensionerar och utformar bergtunnlar för väg eller järnväg idag nämns ofta att de ska dimensioneras för en livslängd av 120 år. Kravet på livslängd som vi avser är egentligen en teknisk livslängdsklass (TLK) 120, men det är inte självklart vad det innebär i praktiken.

De tunnlar som byggdes för 120 år sedan trafikeras fortfarande och uppfyller i stort de krav som vi ställer på nya bergtunnlar idag. Det är därför rimligt att anta att krav och tillgängliga produktionsmetoder i slutet av 1800-talet var tillräckliga för att uppnå dagens krav på livslängd.

Behöver vi därför alla dagens krav och på vilket sätt har ny teknik och ny kunskap bidragit till bättre och säkrare bergtunnlar för järnväg? Här finns en möjlighet att se över dagens krav utifrån våra erfarenheter. Det skulle kunna innebära ett minskat användande av sprutbetong och bergbult, en mer koldioxidsnål anläggning, och framförallt vackrare tunnlar.

---

## 3D-ANALYS AV STATION KORSVÄGEN – EFFEKT AV FÖRSTÄRKNING VID SVÅRA FÖRHÅLLANDEN

*Axel Bolin, Itasca Consultants AB*

*Diego Lope Álvarez, Svensk Kärnbränslehantering AB (tidigare Itasca Consultants AB)*

*Louise Jakobsson, ÅF Infrastructure*

*Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB*

Som en del i projekteringsarbetet för station Korsvägen, vilken ingår i den nya tåg-förbindelsen Västlänken, har en 3D diskontinuumanalys genomförts i syfte att verifiera framtiden layout/design. Stationen ligger i centrala Göteborg, nära Liseberg och Svenska mässan, och korsar 3 svaghetszoner. Den är utformad med mycket stora tunnelseppan som vilar på en rad med betongpelare.

Itasca Consultants utförde diskontinuumanalyser i finita differensprogrammet *3DEC*, främst för att kontrollera storstabiliteten för stationen. Arbetet innefattade en känslighetsanalys med flera initialspänningsfall eftersom det initiala spänningsfältet är en osäkerhetsfaktor. Samtliga analyser visade att taket i en av de centrala uppgångarna var instabilt och en stor kilformation bildades. En kompletterande analys med förstärkning utfördes på stationen, där resultaten visade att förstärkningen och en mer detaljerad uttagssekvens kunde stabilisera taket.

Utöver att demonstrera skillnaden mellan en förstärkt och oförstärkt modell har samtliga analyser också visat att bergstabiliteten var känslig för initialspänningar, samt att samspelet mellan de sprickgrupper som ingick i modellen och spänningarna var viktigt. Utöver detta hade även svaghetszonerna och stationens geometri stor inverkan på stabiliteten.

# **PASSAGE UNDER LÖVSTAVÄGEN VID FÖRBIFART STOCKHOLM - FRÅN DESIGN TILL REALISERING**

*Mattias Roslin, Trafikverket, Sverige*

*Jan Vesely, Amberg Engineering AG, Schweiz*

*Per Salomonson, ÅF Infrastructure AB, Sverige*

Passagen under Lövstavägen var den första kritiska och känsliga sträckan som skulle byggas i projekt Förbifart Stockholm. Svårigheten låg i två ramptunnlar som skulle passera under Lövstavägen med lite eller ingen bergtäckning ovanför hjässan, vilket ledde till utmanande förhållanden med blandad front.

Den tekniska lösningen som hade definierats under projekteringsfasen bestod av en in situ jordförstärkning med jet grouting som skulle utföras från markytan långt innan tunneln började drivas ut, samt en rörskärm i de svåraste delarna som skulle installeras från tunneln, precis framför fronten. Den tillfälliga förstärkningen bestod dessutom av bultning och sprutbetong som skulle appliceras direkt efter sprängning. Efter det skulle den permanenta förstärkningen bestående av en platsgjuten betonglining installeras.

Vid jetpelarinstallationen fick den bergytans exakta läge känd och med den kunskapen kunde anpassningar av den projekterade lösningen ske för att bättre anpassa den till verkliga förhållanden. Så blev det möjligt att bygga tunnlar snabbare utan att dra ner på säkerhetsnivån. Denna artikel presenterar den tekniska lösningens utveckling från den lösningen som hade projekterats till den som faktiskt byggdes.

---

## **AKTIV DESIGN - FÖRSTÄRKNING OCH TÄTNING AV BERG - TPL HJULSTA FÖRBIFART STOCKHOLM**

*Johanna Holmsten, NCC Teknik*

*Cecilia Montelius, NCC Teknik*

*Lars-Olof Dahlström, GolderAssociates*

Förbifart Stockholm är E4:ans nya sträckning från söder till norr. Den omfattar 21 km bilväg varav 18 km är i tunnel. Förbifart Stockholm innefattar även 6 st nya trafikplatser där NCC bland annat bygger Trafikplats Hjulsta Norra vid Hästa gård.

Kontraktet är totalentreprenad med upp till 21 meter djupa bergschakter för betongtunnlar där NCC står för projekteringen av geoteknik, väg, mark, VA och berg. Bergschakt av två stycken 20-meters bergtunnlar i en färdigprojekterad utförandedel ingår också i entreprenaden.

Jordtäcket är ca 5-10 meter vilket betyder att inga berghällar finns i området. Bergmassan i förfrågningsunderlaget (FU) är beskriven från borrhål som delvis ligger utanför bergschakten. Detta har medfört att det finns osäkerheter i bergmassans bergkvalitet och vattenföring. Bergmodellen är uppbyggd av få punkter vilket ökar osäkerheten om bergmassans geometri.

Osäkerheter i bergmassans kvalitet samt höga krav på grundvattenpåverkan har inneburit att utmaningarna i projekteringen har varit att finna sätt att optimera förstärknings- och tätningsinsatserna för att få ett hållbart resultat. Aktiv design har därför använts i projekteringskedet.

Kompletterande undersökningar med utgångspunkt från FU har utförts successivt i samband med åtgärder och förberedelser för anläggningsarbetena. Hur berg- och grundvattenförhållanden följs upp kontinuerligt i byggskedet och hur designen för förstärkning och tätning modifieras samt verifieras kommer att presenteras i detta föredrag.

---

## **EROSION AV INJEKTERINGSMEDEL - KAN DET VARA ETT PROBLEM?**

*Johan Funehag, Tyréns AB  
Thomas Janson, Tyréns AB*

Injektering av berg lyckas oftast täta tunnlar och bergrum till satta krav på inläckage. Ibland uppstår dock problem såsom läckande borrhål, icke härdat bruk i borrhålen eller helt enkelt inte lyckas täta enskilda borrhål. En möjlig förklaring till att bruket inte lyckas täta borrhålen kan vara erosion. Vid höga hydrauliska gradienter utgör vattnet en kraft på bruket som vill trycka sönder, eller skapa en kanal, genom det injekterade området. Höga hydrauliska gradienter kan uppträda i tunnlar på större djup, efterinjekteringar och vid ogynnsamma geometrier mellan borrhål och sprickor. Flertalet tester i en sprickmodell i laboratorieskala har utförts för att visualisera processen erosion samt påvisat hur detta kan motverkas med en längre inträngnings-längd och/eller andra egenskaper på injekteringsbruket. Resultaten visar på hur en erosionsprocess initieras som en kanalbildning genom bruksfronten. Ett samband utvecklades mellan hydraulisk gradient - påverkande kraft - mothållande kraft i bruket som kan användas som en designparameter vid svåra förhållanden för injektering. Det utförda fälttestet visar på en förklaring till att brukets skjuvhållfasthet vid avslut av injektering är av yttersta vikt för att nå ett tätt borrhål. Att finna den hydrauliska gradienten, speciellt då förutsättningar om fenomenet finns, är av vikt för att kunna få samtliga borrhål täta.

---

## **INJEKTERINGSMODELLERING AV VATTENFYLLDA BERGSPRICKOR MED VARIERANDE APERTUR**

*Liangchao Zou, Avdelningen för Resurser, energi och infrastruktur, KTH  
Ulf Håkansson, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, KTH/Skanska AB  
Vladimir Cvetkovic, Avdelningen för Resurser, energi och infrastruktur, KTH*

Modellering och analys av cementbaserade injekteringsmedels strömning är viktiga hjälpmedel för design, utförande och uppföljning av injektering i sprickigt berg. Dagens modeller är ofta baserade på förenklade analytiska lösningar, exempelvis de som ingår i ”Real time grouting control (RTGC)” metoden. För att analytiska lösningar skall kunna användas, antas att sprickorna utgörs av släta, plan-parallella skivor och att dessa inte innehåller något vatten. I verkligheten är dock sprickorna råa, vattenfyllda och med komplexa geometrier, vilket medför att cementinjektering i sprickigt berg i strikt mening är en multi-fas process i en varierande geometri. I föreliggande studie, presenteras en en-dimensionell numerisk model för injektering i en enskild spricka, under beaktande av multi-fas strömning med varierande sprick-öppning. En tidsberoende advektionsfunktion används för att beskriva gränsskiktet mellan injekteringsmedel och vatten och dess förflyttning med tiden. Resultaten visar på en betydande påverkan från sprickornas vatteninnehåll, dels på tryckfördelningen men även på injekteringsmedlets inträngning i sprickorna, särskilt vid låg viskositet. Den varierande spricköppningen gör också att inträngningen blir långsammare i förhållande till fallet med en konstant spricköppning, vilket är förväntat. Den numeriska modellen beskriver förhållandena på ett mer realistiskt sätt, både ur fysikalisk och geometrisk synvinkel, vilket kan utnyttjas i praktiken för att reducera potentiella osäkerheter vid användandet av dagens analytiska metoder.

---

# NYA FRAMSTEG I MÄTNING AV INTRÄNGNINGSFÖRMÅGA AV INJEKTERINGSMEDEL, FÖRBÄTTRING AV SPRIDNING AV BRUKET OCH UTVÄRDERING AV RTGC-TEORIN

*Ali Nejad Ghafar, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, KTH*  
*Almir Draganovic, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, KTH*  
*Fredrik Johansson, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, KTH*  
*Stefan Larsson, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, KTH*

Spridning av injekteringsmedel i bergsprickor påverkar inträngningsförmågan. Syftet med den här studien är att granska befintliga metoder som utvecklats för att mäta inträngningsförmågan hos injekteringsmedel. Filterpumpen och Filterpressen jämfördes mot kort spalt för att förstå vilket som är mer tillförlitlig. Studien betraktade kort spalten som mer tillförlitlig. Vidare utvecklades en lång spalt med varierande spaltvidder (VALS), en artificiell spricka med spaltvidder från 230 till 10  $\mu\text{m}$ , för att studera inträngningsförmågan hos injekteringsmedel mer realistiskt. Utöver det studerades en lågfrekvent rektangulär tryckimpuls för att förbättra spridningen hos injekteringsmedel genom successiv erosion av filterkakor i konsekutiva cykler. Resultaten visade en avsevärd förbättring i experiment genomförda med Kort spalt. Spridningen av tryckimpulser undersöktes också med VALS. Resultatet visade märkbara återstående amplituder efter 2,0-2,7 m in i spalten. Slutligen användes VALS för att undersöka RTGC-teorin. Studien visade en förhållandevis tillfredsställande överensstämmelse mellan försöksresultaten och förutsägelseerna av spridningen hos injekteringsmedel när man använde hydrauliska öppningen som medelstorlek på spalten, medan prognoserna med genomsnittliga fysiska öppningen visade betydligt snabbare spridning.

---

## Session 4: GRUVA

# PROGNOSVERKTYG FÖR INFRASTRUKTURSKADOR I KIRUNAGRUVANS LIGGVÄGG

*Mikael Svartsjaern, Itasca Consultants AB (Tidigare vid Luleå Tekniska Universitet)*  
*Karola Mäkitaavola, LKAB*

Vid skivrasbrytning av den lutande malmkroppen i Kiruna påverkas det omgivande berget på båda sidor av malmkroppen. Liggväggen påverkas till synes i mindre grad än hängväggen då inverkan från brytningen, på markytan, är signifikant mindre. Påverkan på bergmassan under jord i liggväggen, gällande spänningsomlagringar och uppsprickning, kan dock vara kritisk, då hängväggsuppblockningen medför att gruvans infrastruktur i huvudsak förlagts i liggväggens bergmassa. Ny infrastruktur bör generellt placeras så nära malmkontakten som möjligt för att minimera drivningskostnader och transportavstånd men samtidigt på tillräckligt avstånd för att undvika skador relaterade till spänningsomlagringen under brytning.

I detta arbete har ett prognosverktyg tagits fram för att uppskatta den maximala framtida utbredningen av brytningsrelaterade infrastrukturskador i Kirunagruvans liggvägg. Verktyget har tagits fram, och applicerats, i samarbete mellan LKAB och Luleå Tekniska Universitet. Till grund ligger systematisk skadekartering under jord, där brytningens inverkan följts i hela liggväggen under fem år samt numeriska analyser i UDEC och PFC. Modellresultaten har också jämförts med mikro-seismikdata för att validera den simulerade brottsutvecklingen. Brottsutvecklingen i liggväggen visas ske i frånvaro av de vanliga numeriska brottsindikationerna t.ex. koncentrationer av töjningar i så kallade skjuvband. Istället består ”uppsprickningen” av samverkande lokala brott vars beteende kopplas till graden av avlastning.

---

## FÖRSÖK MED HYDRAULISK SPRÄCKNING I LKABs GRUVOR I KIRUNA OCH MALMBERGET

*Kristina Jonsson, Luossavaara-Kiirunavaara AB, Malmberget*  
*Patricia Klara Boeg-Jensen, Luossavaara-Kiirunavaara AB, Kiruna*

Brytning av höghållfasta spröda bergarter kan innebära en utmaning oavsett djup. Höga spänningar och seismiska händelser påverkar brytningen i LKABs underjordsgruvor, både i Malmberget och Kiruna. Att finna metoder för att kontrollera seismiciteten är nödvändigt för att kunna fortsätta brytningen mot djupet.

I Kiruna underjordsgruva består liggväggen till stor del av höghållfasta och styva bergarter. När brytningen går mot större djup förväntas antalet händelser öka i antal och magnitud i liggväggen, vilket motiverar forskning kring metoder för att minska den seismiska risken. Hydraulisk spräckning har i ett flertal andra gruvor uppvisat potentialen att reducera antalet stora seismiska händelser, medan antalet små händelser ökat.

I Malmberget har intakt berg ovanför malmkroppen Printzsköld orsakat seismiska händelser som gett upphov till stora vibrationer i intilliggande bostadsområden. Hydraulisk spräckning har här prövats i syfte att förbättra uppblockningen, så att den kan ske kontinuerligt och med färre störningar mot samhället.

Målen med försöken i bägge gruvorna är att bestämma vilka injektionstryck och vattenflöden som behövs för att propagera sprickor i våra hårda och spröda bergarter. Sprickornas orientering och utbredning övervakades för att ligga till grund för design av en eventuell storskalig implementering.

Spräckningsförsöket genomfördes i Kiruna underjordsgruva under maj 2017 och i Malmberget underjordsgruva mellan juni och augusti 2017.

---

## RADAR FÖR SLÄNTÖVERVAKNING

*Mats Larsson, Boliden*  
*Anton Bergman, Boliden*  
*Jansiri Ekaram Malmgren, Boliden*  
*Hannington Mwagalanyi, Boliden*

Boliden har i dagbrottet Aitik installerat en radar för att under 6 månader utvärdera om det kan tillföra något till den pågående långsiktiga släntövervakningen. Runt om i värden finns cirka 300 installerade radarsystem inom gruvindustrin, de flesta för att ge förvarning om kommande ras. Intressant är att prova hur rörelser kan detekteras i Aitiks berg och miljö (nordiska vinterförhållanden).

Radarteknik medger en hög mätnoggrannhet i siktlinjen för radarvågen men utrustningen kan inte detektera en rörelse vinkelrätt mot siktlinjen. Var radarn ska placeras i förhållande till den slänt som ska övervakas blir därför väsentligt.

I Aitik har man valt att övervaka den norra liggväggen där brytningen för närvarande sker på 390 meters nivå. Avståndet mellan övervakad vägg och radarutrustningen är ca 700 – 1000 meter men utrustningen kan användas för avstånd upp till 4 km. Upplösningen minskar med ökande avstånd.

I juli inträffade ett ras i pallskala som tjänar som ett exempel på hur radarn detekterar en snabb rörelse. Några orsaker till falska larm kommer också att diskuteras i artikeln.

Bidraget kommer att inledas med en kort introduktion om grundläggande mät-principer samt skillnaden mellan Real aperture radar (RAR) och Synthetic aperture radar (SAR). Vidare beskrivs hur testinstallationen i Aitik analyserats och utvärderats.

---

# ATT LYSSNA TILL VAD BERGMASSAN SÄGER

*Jessa Vatcher, Itasca Consultants AB, tidigare Luleå Tekniska Universitet*  
*SD McKinnon, Queen's University*  
*Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB*

Med fortsatt gruvbrytning följer ett antal komplexa bergmekaniska problem, t.ex. seismicitet, spjälkning, utfall och smällberg. En förståelse av dessa fenomen är viktigt med avseende på säkerhet och produktion. Relevanta frågeställningar kring bergmassans beteende i gruvskala är t.ex: Vilka data ska vi samla in? Hur ska vi analysera dessa data? Hur utvärderar vi bergmassans beteende?

Ovanstående frågeställningar har studerats i ett forskningsprojekt vid Luleå Tekniska Universitet, med tillämpning på LKAB:s Kiirunavaaragruva. Det ursprungliga antagandet var att gruvseismicitet orsakades av rörelser längs storskaliga förkastningar. Konventionella och okonventionella data analyserades genom nyutvecklade och befintliga tekniker. Resultaten visade att tidigare hypotes var felaktig, samt på betydelsen av en tidigare delvis förbisedd geomekanisk enhet, nämligen volymer av leromvandling. Dessa områden påverkar spänningsfältet i gruvskala samt möjligheterna för befintliga sprickor att glida.

De mest användbara data hade 3D-täckning, långa dataserier, och kom från separata källor. Integreringen av data i analyserna var avgörande för att utveckla en förståelse för bergmassan. Framtida forskning och användningen av flera typer av okonventionella data, såsom seismicitet, fokalplanlösningar, spänningsinversion, data om överberg och bergutfall, och hastighetsvariationer i bergmassan, har stor potential. För att lyssna till vad bergmassan säger krävs att vi öppnar våra sinnen för möjligheterna, samarbetar med experter inom andra områden än bergmekanik, och är kreativa i vårt analysarbete.

---

## NUMERISKA ANALYSER AV STORSKALIGA DYNAMISKA TESTER AV BERGFÖRSTÄRKNING I LKABs KIIRUNAVAARAGRUVA

*Shahin Shirzadegan, Geosigma*  
*Erling Nordlund, Luleå tekniska universitet*  
*Ping Zhang, Luleå tekniska universitet*  
*Changping Yi, Luleå tekniska universitet*

Sju storskaliga dynamiska tester av bergförstärkning utfördes i LKABs Kiirunavaaragruva. I denna artikel presenteras redovisas de numeriska analyserna. Målet med arbetat var att studera bergets och bergförstärkningens respons på den seismiska vågen som genererats med hjälp av sprängning. En kombination av två program användes vi simuleringen LS-DYNA som är ett finita elementprogram och UDEC som är ett diskretelementprogram. Med hjälp av LS-DYNA beräknades den krossade zonen (CZB) som bildas runt sprängborrhålet. Dessutom beräknades partikelhastigheten som funktion av tiden för denna rand. Detta användes som ett internt randvillkor i UDEC. Inget utstötningsskott inträffade i test 1 och 2 vilket däremot skedde i test 4 och 5. Skillnaden mellan test 1 & 2 och test 4 & 5 var i princip en något mindre försättning samt något starkare laddning. De numeriska analyserna som rapporteras i denna artikel av test 6 visade tillsammans med fälttesterna att skadorna på berget koncentrerades till närmast sprängborrhålet och i väggen närmast ytan. En stor volym av berg däremellan var i princip oskadd. Den ort som var förstärkt uppvisade endast sprickor i sprut-betongen medan utstötningsskott inträffade i den oförstärkta tvärorten. Slutsatsen var att testmetoden fungerade i Test 6 samt att den dynamiska bergförstärkningen klarade av de dynamiska lasterna.



