

# RAISEBORRNING I SVÅRA BERGFÖRHÅLLANDEN – LITTERATUR- OCH PRAKTIKFALLSSTUDIE

## Raiseboring in Difficult Rock Conditions — Literature and Case Studies

*Catrin Edelbro, Itasca Consultants AB*

*Richard Brummer, Itasca Consulting Canada Inc.*

*Matt Pierce, Pierce Engineering*

*Daniel Sandström, Boliden Mineral AB*

*Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB*

## SAMMANFATTNING

I Bolidens gruvor har ett ökat brytningsdjup och därmed ökande bergspänningar, i kombination med varierande bergförhållanden, medfört svårigheter vid raiseborring av schakt. I denna artikel presenteras resultaten från en praktikfalls- och litteraturstudie där alternativa sätt att driva och förstärka raiseborrade schakt i svåra bergförhållanden utvärderats.

Erfarenheter från praktikfallen omfattande schakt med olika längd, diameter och funktion, har nyttjats för att utveckla diagram som kan användas i designstadiet. Diagrammen visar förhållandet mellan maximal tangentiell spänning och enaxiell tryckhållfasthet kopplat till längd och diameter för schakt. I diagrammen anges när initialt brott i berg samt problem under borring kan förväntas.

För schakt som haft omfattande problem under borringen redovisas exempel på hur dessa åtgärdades. Den mest väldokumenterade åtgärden är förförstärkning i form av vertikala skärmar. Det finns dock inget internationellt dokumenterat praktikfall där denna förförstärkning använts i typiska Skandinaviska bergförhållanden på stort djup. Fortsatta arbete bör därför omfatta en analys av bergmassans beteende vid förförstärkning med vertikala skärmar. Även andra tänkbara åtgärder, exempelvis avlastningssprängning, bör studeras via numerisk modellanalys och/eller småskaliga tester i syfte att öka förståelse för styrande mekanismer.

Nyckelord: *Raiseborring, schakt, praktikfall, förförstärkning*

## SUMMARY

Virtually all long ventilation shafts and orepasses in the Boliden mines in Sweden are excavated using raiseboring. With increasing mining depths and hence, increased virgin rock stresses, it has become difficult to keep the shafts intact after boring and until reinforcement or other stabilizing measures have been implemented. This paper contains a

review of literature and case studies of raiseboring in difficult rock conditions. The focus is on design, pre-reinforcement, excavation methods, and final outcomes.

The cases range from long ventilation raises to short stope slots. The data was used to further develop raisebore design charts relating the ratio of maximum tangential stress and *UCS* to raisebore length and diameter. This enabled establishing limits for initiation of failure and problem-free boring that can be achieved using current technology. For problematic shafts, remedial measures such as different types of pre-reinforcement or lining the raise while pulling out the muck are presented.

Good experiences using rings of reinforced piles to allow raiseboring through the deep weathered surface were available from Australia. However, there were no fully described case study with pre-reinforcement in rock conditions similar to those of the Boliden mines. Nevertheless, vertically drilled and pre-reinforced perimeter holes around the eventual raisebore diameter is one suggested possible action. Other remedial measures, such as destress blasting, is suggested to be studied by numerical analysis or/and small scale tests.

## **1 INLEDNING**

Drivning av långa schakt i Bolidens gruvor görs huvudsakligen med raiseborring. Schaktens längd varierar mellan 25 och 650 meter och med en diameter på mellan 2.0 och 6.5 meter. Med ökat brytningsdjup och där tillhörande ökande bergspänningar har stabiliteten för de raiseborrade schakten försämrats. Det har varit problematiskt att hålla schakten intakta (både under och efter borring) till dess att förstärkning eller andra åtgärder vidtagits. Typiska problem under pilotborring och upprymning har varit:

- Konvergens i pilothålet eller det färdiga schaktet (se exempel i Figur 1). Stor konvergens försvårar möjligheten att flytta upprymningshuvud nedåt och därmed utföra underhåll av kuttrar etc.
- Stabilitetsproblem i front och/eller vägg.
- Stabilitetsproblem i närliggande ortar och områden.
- Hårt berg som ger en ojämn lastfördelning på upprymningshuvud.

I denna artikel presenteras resultat från en praktikfalls- och litteraturstudie där alternativa sätt att driva och förstärka raiseborrade schakt i svåra bergförhållanden utvärderats.



*Figur 1 Utfall och konvergens i schakt efter raiseborrning.*

## **2 METODIK**

En omfattande litteraturstudie har genomförts via sökning on-line (Google), databaser (Scopus, Web of Science, Google Scholar, etc.) och publikationer som finns tillgängliga vid Svenska universitet. Gruvindustrins erfarenhet av att driva raiseborrade schakt i svåra bergförhållanden har sammanställts genom praktikfall. För att samla in uppgifter har en enkät tillsammans med ett förklarande brev skickats ut till 13 internationella gruvföretag. Över 60 kompletta enkäter besvarades från sju olika gruvor. För vissa av svaren fanns inte all information tillgänglig, såsom bergspänningar och bergförhållanden och dessa har därför exkluderats i studien. Huvuddelen av de beskrivna praktikfallen är från gruvor där brytning sker på stort djup. Utöver de praktikfall som sammanställts via enkäten har kompletterande praktikfall från tidigare liknande projekt nyttjats.

## **3 PRAKTIKFALL**

Baserat på tillgänglig sammanställd information presenteras i detta kapitel ett antal välbeskrivna praktikfall som berör problematik under raiseborrning. En summering av alla praktikfall, med vertikalt borrade schakt, där det uppstått problem under raiseborrning finns beskrivet i Tabell 1.

Tabell 1 Vertikalt borrhade schakt med problem vid raiseborrning

Gruva och typ av schakt	Längd/ Diameter [m]	Djup* [m]	In situ spänning** [MPa]	Bergarter	Enaxiell tryck- hållfasthet [MPa]	Bergmassans kvalitet	Sprickor och svaghetszoner	Problem
Gruva A, ventilation	750/3.0	1300	$\sigma_H = 58,$ $\sigma_h = 27,$ $\sigma_v = 34$	Kvarts- monzodiorit	95 (27-161)	$GSI = 38$ (26-52).	Sprickavstånd 0.25 m	Borrning stoppades efter 35 m
Gruva A, öppningshål	48/2.4	1300	Som ovan	Andesit	136 ( $\pm$ 24)	$GSI = 40-45$	Sprickavstånd 0.3 m	Spjälkning längs hela schaktet
Gruva C, ventilation	82/2.4	2473	$\sigma_H = 1.6 \cdot$ $\sigma_v = 107$	Granit/Gabbro	210	$RMR = 90$	1 spricka/m	Upprymningshuvud fastnade
Gruva K 1, öppningshål	36.1/1.2	2296	$\sigma_H = \sigma_h =$ 125	Rhyolit koppar, Sulfid zink	110 - 130	Rhyolit koppar $RMR = 65$ and Sulfid zink = 79	2 -3 sprickor/m	Konvergens och seismisk påverkan
Gruva K 2, öppningshål	33/1.2	2335	$\sigma_H = \sigma_h = 95$	Som ovan	Som ovan	Som ovan	Som ovan	Accelererande deformationer
Gruva K 3, öppningshål	37/1.2	2936	$\sigma_H = \sigma_h =$ 150	Rhyolit koppar,	110	$RMR = 65$	3 sprickor/m	Pilotborr och upprymningshuvud fastnade
Lucky Friday malmschakt	15-30/1.8- 3.0	2990	$\sigma_H = 1.5 \cdot \sigma_v$ $\sigma_h = 1.25 \cdot \sigma_v$	Tunt lagrad Argelit, Siltit	70-110 (Argelit) 100-125 (Siltit)	Anisotrop berg	Vertikal foliation med avstånd < 0.15 m	Utfall, knäckning, liner som deformerades.
N-C*** 1, ventilation	227/3.1	815.6	$\sigma_H = 26,$ $\sigma_h = 22$	Skiffer	50-120	$RMR = 59-64$	5-7 sprickor/m	Minskad hastighet på upprymningshuvud
N-C*** 2, ventilation	220/3.1	816	Som ovan	Skiffer, massiv koppar	50-240	$RMR = 38-59$	4-20 sprickor/m	Stort utfall
N-C*** 3, ventilation	150/2.1	760	$\sigma_H = 25,$ $\sigma_h = 21$	Skiffer, vulkanisk breccia	50-240	$RMR = 54-64$	4-12 sprickor/m	Instabila schaktväggar
N-C***, ventilation	345/3.1	630	$\sigma_H = 20,$ $\sigma_h = 17$	Skiffer, gråvacka	50-160	$RMR = 54-63$	1-5 sprickor/m	Utfall av berg från schaktväggarna.

\* Vertikalt djup på botten av schaktet, \*\* In situ spänning vid botten av schaktet, \*\*\* Neves-Corvo gruva

### 3.1 Gruva A – ventilationsschakt

I gruva A drevs ett 750 meter långt ventilationsschakt med en diameter på 3 meter och med schaktbotten på 1300 meters djup. Berggrunden bestod i huvudsak av ådrig till kraftigt ådrig kvartsmonzodiorit. Upprymningen stoppades efter 35 meter på grund av dåliga bergförhållanden. Efterföljande utlastning resulterade i signifikant mer ton än väntat för schaktet. En fjärrlastare användes för att rensa schaktet vid flertalet tillfällen men schaktet rasade igen inom några timmar. När utfallen slutade i schaktet utfördes lastning och upprymningshuvudet sänktes och togs ut. Vid besiktning saknades 10 kutt-rar, se Figur 2. Fortsatta ras inträffade efter att upprymningshuvudet tagits ut och schaktet hade stängts. Genom sonderingsborrning kunde storleken på utfallet som skett bedömas. Sonderingsborrningshålen nyttjades för att gjuta en 3–4 meter betongplugg i schaktbotten. Schaktet, och det tomma rum som rasmassorna lämnat, gjöts igen från plattformen på ovanliggande nivå. Pilothållet fick borras på nytt och för den fortsatta upprymningen användes ett 2.4 m (jämfört med tidigare 3 m) diameter upprymningshuvud.



Figur 2 Upprymningshuvud innan (vänster) och efter (höger) 35 meters borring.

Utfallet bedömdes vara orsakat av lokalt låg blockhållfasthet på grund av ådring och mikrosprickor. En lärdom, för att kunna förutsäga liknande situationer, var att större hänsyn måste tas till omfattning av mikrosprickor då schaktens stabilitet bedöms. En annan lärdom var att för att öka flexibiliteten och minska risken för långvarig påverkan på produktion och drift så bör hellre fler korta schakt användas än ett långt.

### **3.2 Gruva C – ventilationsschakt**

Flertalet schakt har raiseborrats i Gruva C och det redovisade exemplet är ett typexempel på de problem som har inträffat vid borringen. Ett cirka 80 meter långt ventilationsschakt borrades mellan 2390 och 2473 meters djup. Huvudbergarten var en granitgabbro med en enaxiell tryckhållfasthet på ungefär 210 MPa. Platsen för schaktet hade valts ut för att undvika kända skjuvzoner, storskaliga strukturer och biotit.

Under pilothålsborringen uppkom inga problem och upprymningen gick enligt planerat fram till att borringen var nära den gjutna plattan för raiseborren och schaktet nästan färdigborrat. För att undvika sprängning av sista delen så var planen att slutföra genomslaget med raiseborring. De som jobbade dagskift stannade borringen nära genomslaget och fram till nästa morgon stod borren still. Nästa dag hade borrhuvudet fastnat och planen blev då att spränga loss borrhuvudet. Efter ett antal misslyckade försök så beslutades att raiseborren skulle tas bort från plattformen. För att kunna göra detta krävdes att pilotens borrhållstång togs bort. Extra lyftutrustning installerades för att hålla de kvarvarande stängerna på plats och för att inte riskera att tappa upprymningshuvudet. Insatserna resulterade i förseningar i produktionstidplan, risk att förlora eller skada utrustning och en hel del extra arbete. För att undvika liknande händelser arbetar man idag efter principen "hot-seat" the raise, vilket innebär att göra snabba skiftbyten direkt på plats och ha en borring som pågår kontinuerligt till genomslaget.

### **3.3 Gruva K – stope slot raise**

Raiseborrade schakt används i gruva K som svällutrymme för fortsatt rasborring och brytning och benämns i Tabell 1 som öppningshål. Schakten drivs på grund av malm-brytningsmetoden i områden med höga spänningar. Som exempel borrades ett schakt i bergförhållanden där enaxiell tryckhållfasthet var 110 MPa och högsta primärspänningen var cirka 150 MPa. För detta fall skedde konvergens redan vid borring av pilot-hålet. För att bibehålla pilothålets diameter borrades hålet om flera gånger innan upprymningshuvudet monterades. Eftersom höga spänningar och konvergens var att förvänta och som kunde medföra risk att fastna med upprymningshuvudet så sänktes huvudet ut ur schaktet mellan alla skiftbyten och stillestånd.

Baserat på de flertalet inspektioner som utfördes i schaktet så kunde man se utfall och löst material som bildades ungefär 2-3 meter under plattformens nivå, se Figur 3. Orienteringen på uppsprickningen dokumenterades för att kunna nyttjas för framtida dimensionering och placering av schakt. Utöver höga spänningsnivåer så inträffade även seismiska händelser, med lokala magnituder på 2.8, vilka påverkade borringen negativt.



Figur 3 Kraftig uppsprickning och konvergens efter färdig raiseborring.

## 4 DIMENSIONERING OCH DESIGN AV SCHAKT

### 4.1 McCracken & Staceys metod

McCracken & Staceys empiriska metod (McCracken & Stacey, 1989) används ofta vid design av raiseborrade schakt. Metoden baseras på  $Q$ -systemet tillsammans med justeringsfaktorer för schakt (vägg, orientering och påverkan av vittring) enligt:

$$Q_R = Q \cdot Adjust_{wall} \cdot Adjust_{orientation} \cdot Adjust_{weathering} \quad (1)$$

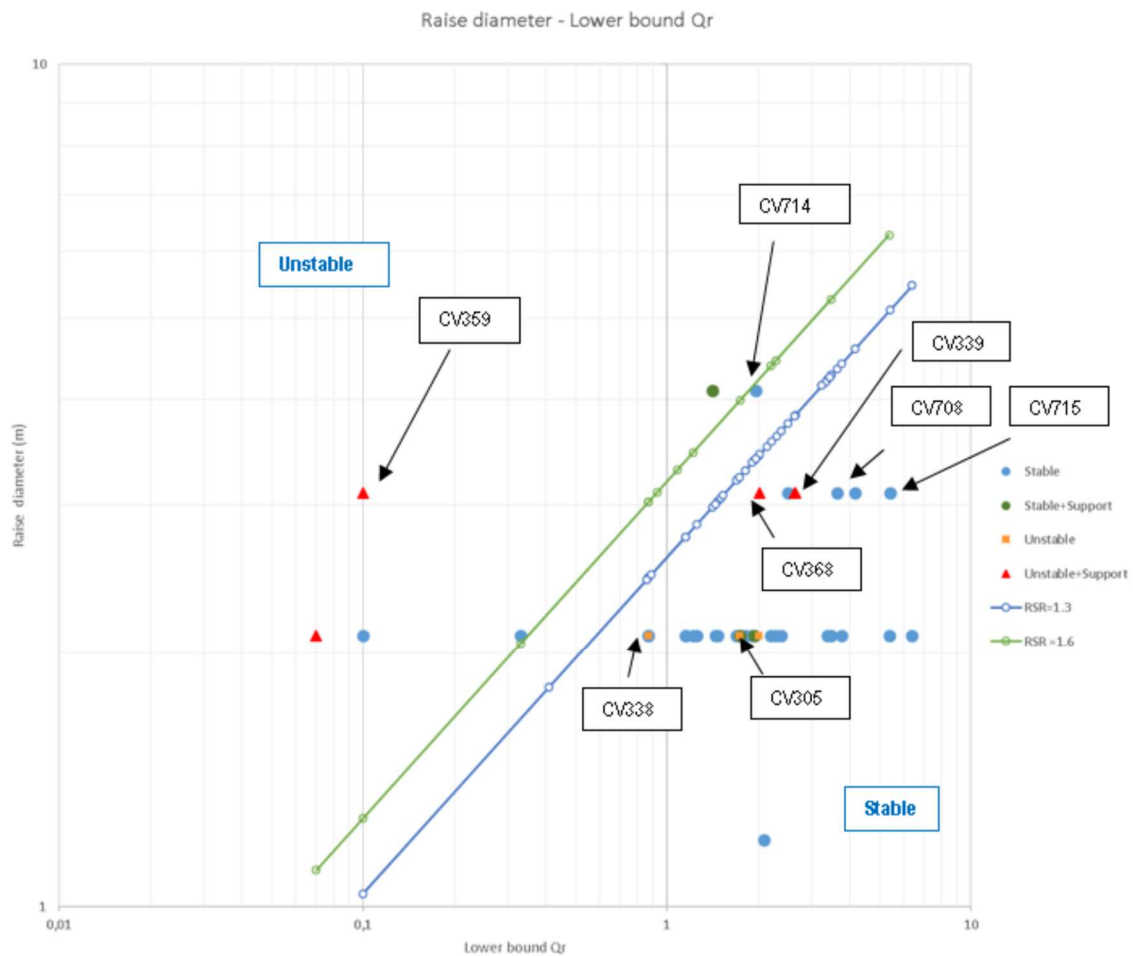
Ett stabilitetsvärde för schakt ( $RSR$ ), vilket motsvarar Excavation Support Ratio ( $ESR$ ) i  $Q$ , representeras av värdet 1.3 för ventilationsschakt och 1.6 för malmschakt. Den största diameter på ett oförstärkt schakt definieras av:

$$span_{max} = 2 \cdot RSR \cdot Q_R^{0.4} \quad (2)$$

Baserat på en omfattande studie har data för 11 ventilationsschakt och två malmschakt sammanställts för gruvan Neves-Corvo. Diametrarna på schakten varierade mellan 2.1, 3.1 och 4.1 meter med längder mellan 66 och 345 meter. För alla schakt i Neves-Corvo sammanställs geomekaniska data (exempelvis  $J_a$ ,  $J_r$ ,  $RQD$ , antalet sprickor,  $J_w$ ,  $SRF$ ) i en databas. Databasen används för att kunna jämföra förväntad stabilitet med resultat

efter slutförande. McCracken & Staceys metod används och resultatet jämförs sedan med observationer i fält, se Figur 4.

För flertalet av Neves-Corvos praktikfall så har det inte varit några allvarliga komplikationer under raiseborrningen. Resultatet från tillämpningen av McCracken & Staceys metod stämmer bra överens med verkligt resultat i fält. Vissa av schakten var dock instabila trots ett uppskattat högt  $Qr$ -värde. Enligt erfarenheter från schaktstabilitet i Neves-Corvo gruva så är loggningen av kärnborrhål/pilothål det viktigaste arbetet att göra noggrant för att kunna ge ett relevant underlag vid bedömning av bergets kvalitet och egenskaper.



Figur 4 Schaktets diameter och  $Qr$  för alla schakt i Neves-Corvos databas.

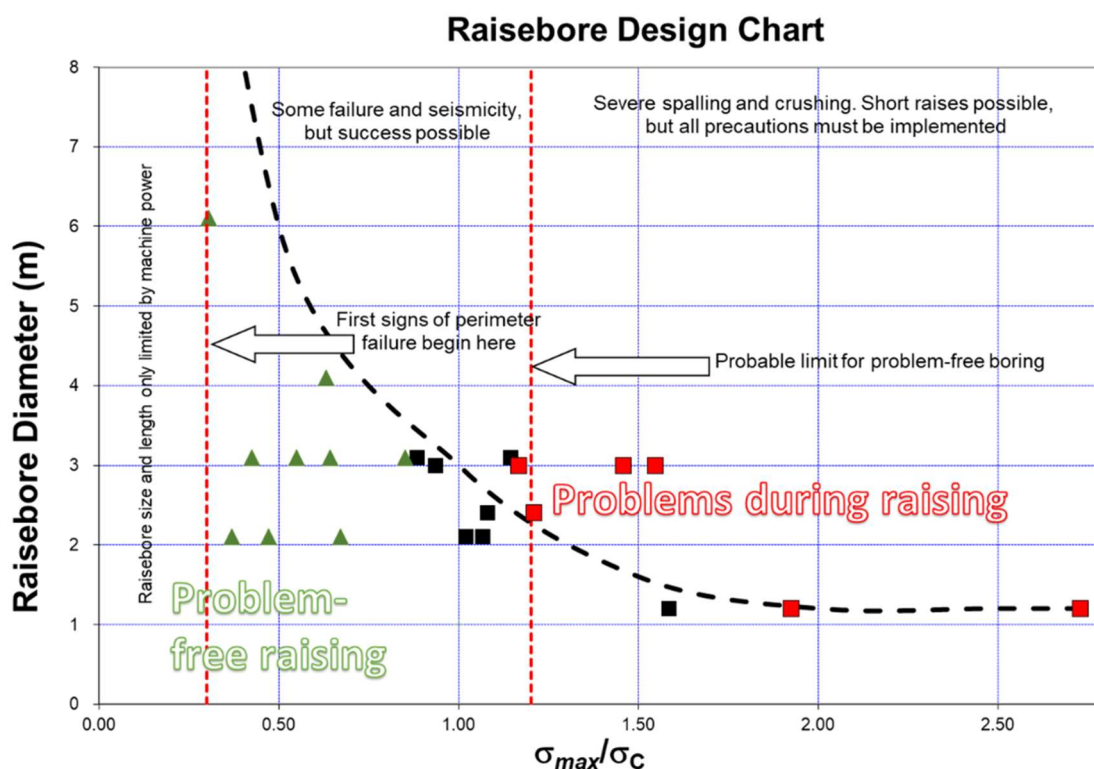
## 4.2 Dimensioneringsdiagram

Dimensionering och metoder för att bedöma långtidsstabilitet och livslängd på malm-schakt sammanställdes av Brummer (1998). Praktikfallen i Brummer (1998) var hämtade från främst kanadensiska gruvor med berggrund motsvarande hårt berg med spröd

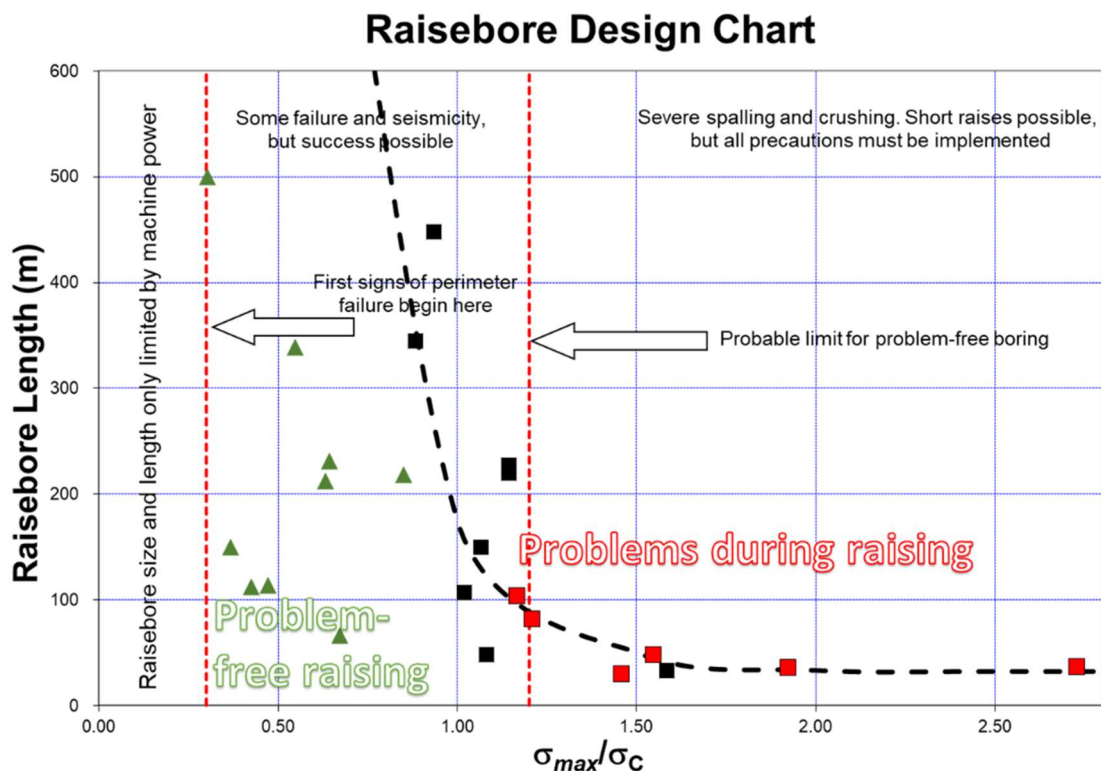


karaktär. Ett stabilitetsindex definierades som relaterar enaxiell tryckhållfasthet ( $UCS$ ) till maximal tangentiell spänning ( $\sigma_{max} = 3\sigma_H - \sigma_h$ ) runt ett cirkulärt schakt. Genom att nyttja den information och den metodik som Brummer använde 1998 tillsammans med informationen för denna studie kunde en vidareutveckling av diagram för dimensionering utföras. Diagrammen visar förhållandet mellan maximal tangentiell spänning ( $\sigma_{max} = 3\sigma_H - \sigma_h$ ) och enaxiell tryckhållfasthet ( $UCS$ ) kopplat till diameter (Figur 5) och längd (Figur 6) för schakt. I diagrammen anges, baserat på erfarenhet från gruvorna, när initialt brott i berg samt problem under borring kan förväntas. Baserat på observationer i fält förväntas initialt brott uppträda vid  $\sigma_{max}/UCS$  värden på ungefär 0.3. Nästa gräns, då omfattande spjälkning och uppblockning startar, uppträder vid  $\sigma_{max}/UCS$  förhållanden på ungefär 1.2–1.5. Längden på schakt har liten påverkan på resultatet för låga  $\sigma_{max}/UCS$  värden. För höga värden på  $\sigma_{max}/UCS$  så är däremot både längd och diameter begränsad.

Alla praktikfall som presenterades i Tabell 1 är inkluderade i diagrammen tillsammans med praktikfall där det inte var något problem under borringen. Problemfria schakt är märkta som gröna trianglar i diagrammen (Figur 5 och Figur 6) och schakt med allvarliga problem under borring är märkta som röda fyrkanter. Svarta fyrkanter representerar schakt som haft viss problematik under borring men inte av allvarlig karaktär.



Figur 5 Diagram för dimensionering av schakt som relaterar förhållandet  $\sigma_{max}/UCS$  till schaktets diameter. Den streckade linjen representerar ungefärlig gräns för problemfri raisborring.



Figur 6 Diagram för dimensionering av schakt som relaterar förhållandet  $\sigma_{max}/UCS$  till schaktets längd. Den streckade linjen representerar ungefärlig gräns för problemfri raisborrning.

Diagrammen kan användas för alla typer av schakt eftersom de berör korttidsstabilitet, det vill säga stabilitet under borrning och innan den permanenta förstärkningen installerats. Liksom andra empiriska metoder så kan dessa diagram ge en indikation på om borrningen kommer att innebära problem eller inte.

## 5 ÅTGÄRDSFÖRSLAG

För att kunna genomföra raiseborrning och undvika att människor behöver arbeta i schakt vid svåra bergförhållanden så behöver åtgärder genomföras innan eller under borrning. Tre exempel på hur väggarna i schakt har förstärkts och åtgärdats är:

- Fylla schaktet med lösmassor för att skapa ett mothållande tryck mot väggarna. Ett exempel på praktikfall där man utfört detta är i gruvan Lucky Friday. När borrningen var färdig installerade man rör, som var något mindre än schaktets diameter, från ovanliggande nivå samtidigt som man lastade ut schaktet. När installationen var klar fyllde man tomrummet mellan rör och berg med injektionsbruk.

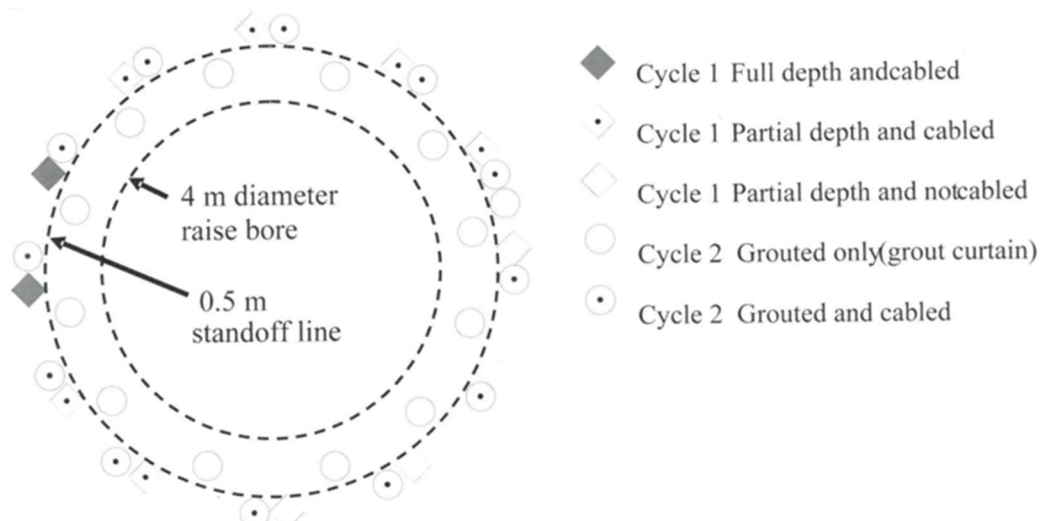
- Frysning av berggrunden (Vervoorn, 2005) har använts av gruvbolagen North Selby Coalfield (Yorkshire in UK), White County Coal (Illinois in USA) och Potash Mining (Saskatchewan in Canada). Syftet med frysningen har varit att öka hållfastheten för uppsprucket och sprickigt berg.
- Förförstärkning genom vertikala förstärkta hål runt schaktet (vertikal skärm) har installerats och testats i exempelvis gruvorna Bendigo Gold, Callie Gold, Cadia East, Mt Isa, Olympic Dam och Wattle Dam Gold (Marlow m.fl., 2013).

De mest väldokumenterade praktikfallen angående åtgärder för att förbättra schaktstabiliteten är vertikala skärmar. Därför presenteras denna metodik mer ingående med exempel från några praktikfall. För schakt som borrar från markytan i Australien är den svåraste passagen genom den översta svaga och vittrade berggrunden. I Athena Gold gruva (Marlow m.fl., 2013) borrades ett 27 meter långt schakt med 4.5 meter diameter. De översta 10 metrarna förväntades utgöras av extremt svag berggrund. De designmetoder man använde indikerade att det skulle bli problem vid borrhning och med en sannolikhet för ras för 50% av schaktets längd. Runt det blivande schaktet borrades därför 24 hål för pålning med en diameter på 200 mm och längd på cirka 27 meter. Eftersom pålningslängden motsvarade schaktets längd så passerade en del hål den nedre nivån för utlastningstunneln. För att förstärka pålarna så gjöts tidigare använda borrhstänger in i hålen. Borrhstängerna var sammankopplade och centraliserade i hålen genom distanser. Vid upprymningen så borrade man in i några av borrhstängerna vilket medförde att ett nytt upprymningshuvud installerades med en mindre diameter.

Ett annat exempel är från gruvan Trident mine i Australien där två 150 meter djupa ventilationsschakt, med 3 respektive 4 meters diameter, borrades från markytan (Sexton m.fl., 2008). Förundersökningsborrningar indikerade, för båda schaktens placering, ett svagt och vittrat berg ner till 50 meters djup från markytan. En 5 meter bred zon av mjuk lera förväntades på 25 meters djup för schaktet med 4 meters diameter.

Planen var att installera 20 stycken pålar från markyta och ner till den starkare berggrunden på 55 meters djup innan upprymningen påbörjades för schaktet med 4 meters diameter. Två vertikala ringformade skärmar av pålar utformades. Den yttre ringen, som var förstärkt med kabelbult, placerades på avståndet 0.5 meter från schaktets kontur och den inre ringen (oförstärkt) på avståndet 0.15 meter, se Figur 7. Pålarna designades med en diameter på 270 mm och med ett avstånd på 1.47 m.

På grund av viss problematik med den grova diameter på hålen utfördes ny borrhning med mindre diameter (140 mm). En ny inre ring borrades och injekterades för att fylla igen de utfall och hålrum som skapades vid den första borrhningen. En efterföljande yttre ring borrades och kabelförstärktes. Schaktet raiseborrades utan svårigheter. Små bitar av de inre pålarna rasade dock ut och den totala utlastade volymen var 95 m<sup>3</sup> mer än förväntat. Mängden överberg var i huvudsak från ett lokalt område där ras av material skedde ut till pålarna.

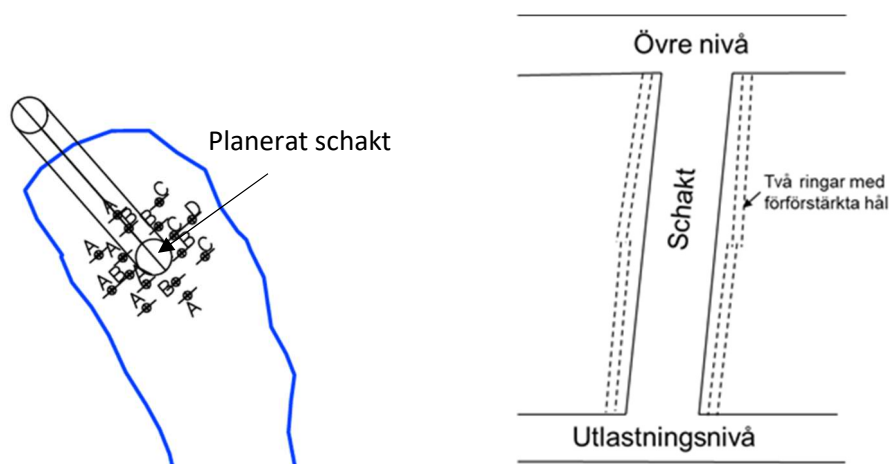


Figur 7 Layout av vertikal skärm med pålar vid gruvan Trident mine (Marlow m.fl., 2013)

Ovanstående praktikfall angående förstärkta vertikala skärmar är hämtade från Australien, där problematiken, spänningsbilden och berggrunden skiljer sig från typiska skandinaviska bergförhållanden på stort djup. För två fall från en gruva i Kanada finns exempel på kabelförstärkta skärmar. Berggrund och spänningssituation är inte beskriven för dessa fall men med avseende på schaktens nivå under mark (2900 m) och berggrundens karaktär i övriga delar av gruvan så anses detta åtgärdsförslag vara tillämpligt även för Bolidens bergförhållanden.

Skärmar borrades och förstärktes innan raiseborringen av de 30 respektive 60 meter långa ventilationsschakt startade. Båda schakten lutar cirka 75°. Hål, med en diameter på 54 mm och ett hålavstånd på 1 meter, borrades på ett avstånd av 1 meter ut från schaktets blivande kontur. Ytterligare hål borrades mellan de första hålen men med avståndet 2 meter ut från schaktets kontur, se Figur 8. Eftersom förförstärkningshålen borrades från både övre och undre nivån av schakten så borrades de med en längd motsvarande halva längden av schaktet (Figur 8). Hålen borrades med en liten vinkel ut från schaktet för att öka flexibiliteten och möjligheten för upprymningshuvudet att ha en borrhålsavvikelse utan att borra in i kablarna.

Eftersom vertikala förförstärkta skärmar har testats i stor skala i flera gruvor anses detta vara ett förslag på åtgärd för Bolidens gruvor. För att åstadkomma en förstärkning som tål viss rörelse och har en hög dragspänningskapacitet bör förstärkningen utgöras av exempelvis sammankopplade bultar eller kabelbultar och betong. Liknande förstärkning bör klara höga spänningsnivåer i berget men eventuellt inte effekter från smällberg. Boliden har nyligen testat delar av detta koncept, med blandat resultat. För att öka förståelsen för vilken förstärkning som vore lämplig såväl vid smällberg som för normala högspänningssituationer bör ytterligare studier genomföras genom förslagsvis numerisk modellering kopplat till fältförsök.



Figur 8 Till vänster planvy över borrhålens placering för den övre nivån. Till höger en schematisk skiss som visar borrhålens längd och lutning i relation till schaktet.

Utöver de åtgärdsförslag som presenterats så kan avlastningsprängning vara ett alternativ. Eftersom det inte finns något beskrivet praktikfall för schakt där detta utförts så bör eventuellt fortsatt arbete inkludera numerisk modellanalys och/eller småskaliga tester i syfte att öka förståelse för styrande mekanismer.

## 6 SLUTSATSER

Praktikfall från raiseborrning i svåra bergförhållanden har summerats i detta arbete. Schakter har varierat i diameter (1.2–6.1 m) och längd (15–750 m). Baserat på resultaten från denna studie bör följande tas hänsyn till vid raiseborrning:

- Kontinuerligt pågående borrning och utföra så kallad "hot seat the raise" för att undvika att upprymningshuvudet fastnar.
- Om kontinuerlig borrning inte går att utföra bör upprymningshuvudet sänkas ner ur schaktet mellan skiftbyten och stillestånd.
- Om bergförhållandena blir sämre än förväntat kan, om detta tolereras, upprymningshuvudets diameter reduceras.
- Använd kortare schakt för områden där bergförhållandena anses vara svåra. Uppdelad totallängd i kortare schakt minskar risken för att långa schakt blir flaskhalsar som leder till stopp under lång tid.

De framtagna diagrammen för dimensionering kan användas för alla typer av raiseborrade schakt eftersom de berör korttidsstabilitet under borrning. Diagrammen kan ge en indikation på om det finns risk för spänningsrelaterade problem under borrning. För fall där tryckspänningsinducerade utfall är troliga bör en tydlig sammanställning av förväntad geologi och bergmekaniskt underlag utföras. För gruva A hade ådring och

mikrosprickor stor lokal påverkan på bergets hållfasthet. Därmed bör sammanställningen ha fokus på variationer i bergets hållfasthet, foliation, svaghetszoner, ådring och mikrosprickor.

Baserat på olika åtgärdsförslag för att kunna genomföra raiseborring av schakt i svåra bergförhållanden anses förförstärkning genom ringformade vertikala skärmar runt det blivande schaktets kontur vara en möjlig åtgärd. Eftersom det inte finns fullständiga uppgifter angående de fall där denna typ av förförstärkning utförts så kvarstår frågan för vilka brottmekanismer som förförstärkningen fungerar. Fortsatta arbete bör därför omfatta en analys av bergmassans beteende vid förförstärkning med vertikala skärmar. Även andra tänkbara åtgärder, exempelvis avlastningssprängning, bör studeras via numerisk modellanalys och/eller småskaliga tester i syfte att öka förståelse för styrande mekanismer.

## TACK

Vi vill tacka alla gruvor som har delat information och data för denna studie. Ett speciellt tack går till João Gabriel (gruvingenjör vid Somincor) som har delat med sig av sin erfarenhet och data från ventilations- och malmschakt i Neves-Corvo gruva. Vi vill också rikta ett stort tack till Boliden Mineral AB som medgivit publicering och presentation av detta arbete.

## REFERERADE ARBETEN

Brummer, R. 1998. *Design of Orepases. Methods for determining the useful life of orepases based on previous experience and case studies*. Submitted to CAMIRO Mining Division Limited, Sudbury, Ontario, January, 1998.

Marlow, P., Webber, S., Mikula, P. A. & Lee, M. 2013. Bored reinforced piles for raisebore support: four case studies, and guidelines developed from lessons learnt. *Mining Technology* 122:3, pp. 159-165.

McCracken, A. & Stacey, T.R. 1989. Geotechnical risk assessment for large-diameter raise-bored shafts, in *Proceedings of the Second International Conference on Shaft Design and Construction*, Institute of Materials, Minerals and Mining, London.

Sexton, M., Mikula, P. A. & Lee, M. F. 2008. Trident mine raise bore – a bored pile case study, in *Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (SHIRMS)*, Perth, Australia, October 2008, The Australian Centre for Geomechanics, 137–148.

Vervoorn, R. 2005. *Wall support for raise bored shafts*. Master thesis. Department of Geotechnology. Geo-engineering programme. TU Delft.