© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

# ORTDRIVNING OCH SKADEZONSBEDÖMNING I LKAB:S KIRUNAGRUVA

Ulf Nyberg, SveBeFo, Stockholm, Stig Fjellborg, LKAB, Kiruna

## Sammanfattning

LKAB har i samarbete med SveBeFo genomfört ett projekt för att anpassa ortdrivning och skivrasbrytning efter de geologiska förhållandena i olika delar av Kirunagruvan.

I projektet ingick försök med utökade ortareor vilket innebar högre stabilitetskrav med hänsyn till stigande bergtryck vid fortsatt avsänkning av gruvan. Kraven på slutkonturer nära de teoretiska ortprofilerna var därför också höga. För att uppnå detta tillämpades bland annat skonsam sprängning och efterföljande analys av sprängskador.

Försök och utvärdering av skonsammare skrotningsmetoder som Vattenskrotning och roterande Fräshjul genomfördes också i syfte att uppnå bra slutkonturer. Bra slutkonturer har uppnåtts även i mycket dåligt berg när borr- och laddplaner anpassats och sprängämnesförbrukningen minskats utan att indrifterna försämrats.
Vattenskrotningen har fungerat bättre än väntat men fortfarande återstår en del utvecklingsarbete.

I projektet som till stor del genomförts i LKAB:s gruva i Kiruna bedömdes sprängskador i ortkonturen dels i magnetitmalm och dels i gråberg. Bedömningarna baseras på skadeprognoser i berget. Försök till verifiering av prognoserna kunde genomföras i gråberget genom kartering av radiella sprickor i sågsnitt tvärs halvpipor i ortkonturen. Malmen var svårkarterad främst för att den var söndersprucken och tvärades av flera spricksystem längs mätorten. Verifiering av malmprognoserna bedömdes därför inte möjlig.

De planerade stegen i bergskadeanalysen kan sammanfattas:

1. Att tvärs respektive längs mätorten dels bestämma våghastigheten, dels bestämma maximala svängningshastigheten (PPV- värden) från uppmätta och integrerade accelerationssignaler,
2. Att tvärs mätorten bestämma PPV- värden från långa spränghål i malm och i gråberg.
3. Att göra prognoser av bergskadorna i malm och gråberg i ortkonturen bakom kvarstående halvpipor utifrån PPV- värden med hjälp av två olika empiriska ekvationer ursprungligen av Holmberg och Persson och av Hustrulid.
4. Att verifiera prognoserna i malm och i gråberg genom att kartera sågsnitt tvärs kvarstående halvpipor i malm- och gråbergskonturen.

Malmen
För malmen har punkterna 1, 2 och 3 kunnat genomföras.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Integrerade accelerationssignaler från 23 stycken nollförsök och 2 stycken ortsalvor, har minsta kvadratpassats för bestämning av platskonstanterna i de två ekvationerna. Sammanlagt 204 signaler i två riktningar kunde användas.

Vågutbredningshastigheten mellan laddningar och mätpunkter var ca 4880 m/s tvärs mätort och ca 6270 m/s längs mätort. Detta tyder på att dämpningen är större vinkelrätt förkastningar, skölar och slag.

Platskonstanterna har använts i ekvationerna för att finna svängningshastigheter beroende av avstånd från laddning. Med hjälp av ett skadekriterium har gränsen 0,36 m/s tvärs mätorten och 0,23 m/s längs mätorten uppskattats.

Tvärs mätort blev de kritiska skadeavstånden från laddningar ca 1,1-1,7 m för Kimulux (K) $\phi_e$22 i $\phi_h$48 mm hål och 3,1 - 4,1 m för fulladdade KR i $\phi_e$48 mm hål. I riktning längs mätorten blev kritiskt avstånd ca 0,5-1,0 m för K$\phi_e$22 i $\phi_h$48 mm hål och ca 1,2 – 3,8 för fulladdade KR i $\phi_e$48 mm hål. Variationen av uppskattade skador beror på valet av prognosekvation och i dessa ingående platskonstanter. Speciellt varierar dämpningskonstanten i Hustrulids ekvation om man inte sätter in beräknade borrhålstryck, bergdensitet och bergvågshastighet.

Resultaten från sprickkarteringen visar att urvalet var för litet för verifiering.

Gråberget

För gråberget har punkterna 2, 3 och 4 genomförts.

Sammanlagt 48 stycken värden från de fyra ortsalvorna kunde användas för bestämning av platskonstanter i de två ekvationerna.

På samma sätt som i malmen bestämdes kritisk svängningshastighet till 1,1 m/s. Här blev skadeavståndet 0,5-0,7 m för K$\phi_e$22 i $\phi_h$48 mm hål i konturen och något lägre för $\phi_h$64 mm hål. För hjälparhålen med K$\phi_e$29 i $\phi_h$48 mm blev värdena ca 1,1 m och för K$\phi_e$32 i $\phi_h$48 mm något lägre. Slutligen blev värdet 0,4-0,5 m för Gu22 i $\phi_h$64 mm hål.

Sågningar utfördes i konturen för 3 av 4 salvor. Uppmätta spricklängder stämmer bra med förutsagda skador för en salva och sämre för de övriga. Ett undantag var prognoser med hjälp av Hustrulids ekvation med given bergvågshastighet, bergdensitet och sprängämnestryck. Där var överensstämmelsen god för en salva när övriga var dålig.

För elektronisk momentan initiering gick det inte att använda de aktuella prognosmodellerna därför att signalerna från flera spränghål interfererar i mätpunkterna och alvarligt försvårar utvärdering. Försöken visar emellertid att sprickorna från momentant initierad kontur blir kortare än för kontur med normal tändspridning. Försöken visar alltså att man bör ifrågasätta sambanden mellan svängningshastighet och spricklängder.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

## Inledning

Den senaste 15 årsperioden har skivrasbrytningen i Kirunagruvan successivt skalats upp från 12 meters skivhöjd 1985, till dagens 27 meter. Skivrassalvornas storlek har ökat från 1200 ton till 10000 ton. Utlastningsorternas storlek har förändrats en gång under perioden med en breddning från 5,0 meter till nuvarande 7,0 meter.

Svällutrymmet vid sprängning av salvorna motsvaras i huvudsak av utlastningsorten eftersom bakomliggande rasmassor och fast sidoberg begränsar övriga svällriktningar. Vid 12 meters skivhöjd och 5,0 meters ortbredd motsvarade utlastningsortens area 20 % av salvans volym. Vid 27 meters skivhöjd och 7,0 meters ortbredd motsvarar utlastningsorten endast 5 % av salvans volym. Svällutrymmet för salvorna har dramatiskt reducerats under denna period vilket troligtvis påverkat utlastningsgraderna.

Kraven på alla i produktionskedjan ingående moment är idag mycket höga och störningar skapar ett ojämnt malmflöde. En breddning av utlastningsorterna skulle kunna minska störningarna och skapa bättre förutsättningar för ett jämnare malmflöde.

Under 1997 infördes ett nytt system för brytningen där malmkroppen från 820 meters nivån delades upp i fem isolerade delgruvor. Denna förändring av brytningen skapade möjligheter för en anpassning av ortdrivning och skivrasbrytning efter de geologiska förutsättningarna i varje delgruva. Tidigare hade samma ortprofiler, borrmönster och laddplaner använts över hela gruvan utan hänsyn till de geologiska förhållandena.

En ökad ortarea medför högre krav på stabilitet vilket i sin tur medför ökade krav på skonsam sprängning för att få en bättre slutkontur med mindre skador och därigenom minskad skrotning och förstärkning.

Begreppet skadezon är omdiskuterat Ouchterlony [13]. Andersson [4] har i en SveBeFo- rapport definierat skadezonen. Man säger att: skadezonen är den zon runt aktuell bergkonstruktion där förhållanden och egenskaper i berget förändras så mycket vid utbrytningen att dess funktion påverkas negativt i teknisk/ekonomisk mening. För prognoserna i detta arbete används ordet skador för att indikera att berget utsatts för svängningshastigheter som är kritiska för stabiliteten.

När det gäller de karterade skadorna definieras dessa som spricklängder från halvpipor i konturen. Sprickorna förutsätts komma från konturhålen men prognoserna visar att svängningshastigheten från hjälparhål, strosshål och kilhål kan överskrida kritiska värden i kvarstående slutkontur. Konturen kan alltså ha utsatts för upprepade töjningar som är negativa för stabiliteten.

För verifiering av skadeprognoserna togs sågsnitt tvärs kvarstående halvpipor ut i konturen med en beprövad metod för sprickkartering. Denna har använts under större delen av 90- talet på SveBeFo. I en sammanfattande rapport av Olsson och Bergqvist [3] redovisas mekanismerna vid flerhålssprängning samt resultat och rekommendationer.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

## Genomförande

Ortdrivningen genomfördes i två områden på 765 meters nivån med vitt skilda geologiska förhållanden. Det ena var område norr klassat som dåligt berg med krosszoner och pyritgångar i varierande bredder och RQD- värden mellan 0 till 75 med ett medelvärde på 29. Fyra orter drevs i området. Det andra var område söder som var klassat som normalt men storblockigt berg, RQD- värde mellan 55 till 95 med ett medelvärde på 75.Tre orter drevs i området. RQD- värdena baserades på provborrningar i de aktuella områdena. Projektet omfattade bland annat följande moment:

- Utarbetande av nya bredare ortprofiler
- Salvoptimering utgående från de geologiska förutsättningarna
- Undersökning av antalet odetonerade hål i ortsalvorna
- Bergskadeanalyser
- Försök med skonsamma skrotningsmetoder

### Utarbetande av nya bredare ortprofiler

Förutsättningarna för projektet var att utveckla ortprofiler med ökad bredd men med bibehållen takhöjd för att öka svällutrymmet för efterföljande skivrassalvor. Som dimensioneringsunderlag för de nya tvärorterna utfördes fältförsök samt numeriska analyser. Fältförsöken bestod av deformationsmätningar, spänningsmätningar samt skadekartering i befintliga 7,0 meter breda tvärorter [5].

### Salvoptimering

Utveckla borr- och laddplaner för olika geologiska förhållanden tillämpbara i de olika delgruvorna. Förutsättningarna för salvoptimeringen var:

- Använda gällande borr- och laddplaner som grund vid optimering för att inte försvåra borrning om datahjälpmedel slås ut
- Undvika komplicerade laddmönster
- Förborrat 250 mm grovt öppningshål fick användas
- Elektroniska tändkapslar fick användas under de olika optimeringsfaserna

### Odetonerade hål i ortsalvor

Utsläpp i form av spränggaser och sprängämnesrester ger förhöjda halter av främst kväveföreningar som läcker ut i närliggande yt- och grundvatten. För att få en bild av hur många hål som egentligen fungerar i en ortsalva utförde SveBeFo funktionskontroller i samband med bergskadeanalyserna. Ytterligare tjugo salvor kontrollerades av Kimit AB. Serien omfattade salvor med både pyrotekniska och elektroniska tändkapslar.

### Bergskadeanalyser

I detta avsnitt redovisas genomförandet av det så kallade nollförsöket och ortdrivningen i malm respektive i gråberg. Gråbergsförsöken visas mer i detalj därför att sprickkarteringen lyckades bättre där.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

*Malm*

Mätningarna inleddes i malmen med ett så kallat nollförsök. Detta hade till syfte att bestämma platsspecifika parametrar i de aktuella ekvationerna och effekten av frikopplade laddningar. Frikopplingen definieras som $\phi_e/\phi_h$ med $\phi_e$ som sprängämnesdiameter och $\phi_h$ som håldiameter. Frikopplingen varierandes mellan 0,22-1,00. Totalt 23 stycken 0,5 m långa laddningar placerades en i taget i öppna borrhål och initierades. Från dessa kunde 125 stycken integrerade accelerationssignaler användas för analys. I nollförsöken användes laddningsdiametrarna $\phi_e$22 mm K42, $\phi_e$29 mm, $\phi_e$36 mm, $\phi_e$40 mm och $\phi_e$50 mm K82. Fulladdade hål laddades pumpemulsion KR0000.

Mätningar utfördes i två riktningar i malmen. Dessa var tvärs mätort och längs mätort. Riktningen tvärs mätort var approximativt vinkelrät mot förkastningar, skölar och slag.

Mätsystemet bestod av i berg ingjutna 2D- och 3D- accelerometrar ca 3-20 KHz, koaxialkablar typ RG58, "signal conditioner" Isotron Mod. 2793 med 16 kanaler och en bandspelare SIR1000 DC-20 KHz med 16 kanaler.

När det gäller ortsalvorna så hade dessa en frontyta av ca 42 m$^2$ med 5 m långa $\phi_h$48 mm hål. Ett grovhål på 250 mm fanns i salvorna 1-5. Det genomfördes 6 stycken mätningar tvärs mätorten. För huvudanalysen har salvorna 3 och 5 använts. Syftet var som i nollförsöken att bestämma platsspecifika konstanter i ekvationerna för senare skadeprognoser. Dessa visas i *figur* 7.

Sprickkartering: För verifiering av prognoserna sågades ett antal slitsar vinkelrätt ortväggen tvärs halvpipor. Dessa var ca 0,5 m breda, ca 2 m höga och ca 0,5 m djupa. Sprickkartering utfördes sedan för salva 2, 3, 4 och 6.

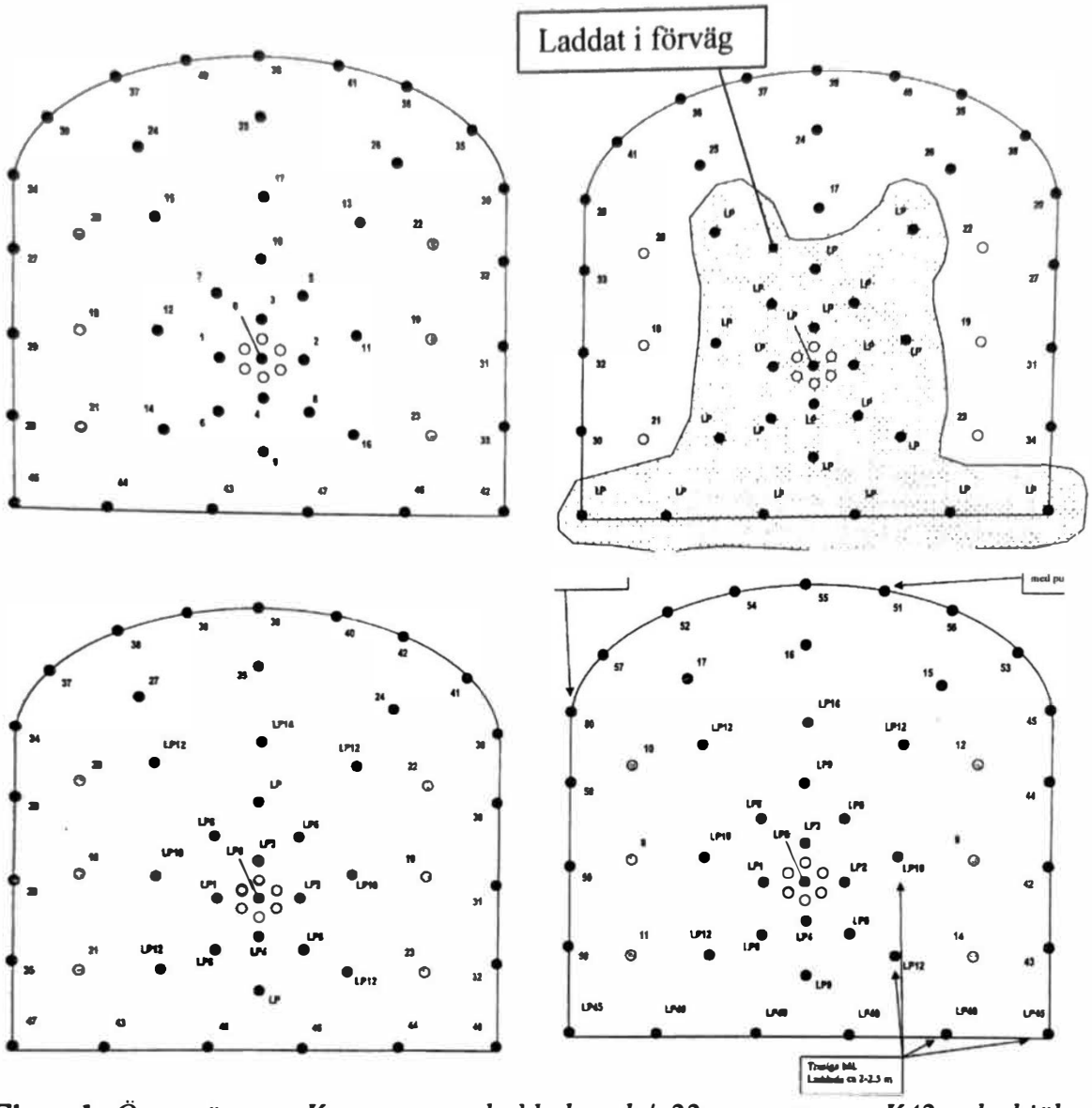
*Gråberg*

Från malmförsöken kunde vi se att det var stor skillnad i antalet synliga hålpipor i vänster respektive höger vägg, svårt att utvärdera sprickor i mycket uppsprucket berg när referensdata saknas och svårt att utvärdera accelerationssignalerna från momentan initiering med hjälp av PPV- modellerna.

Detta medförde att vi planerade undersöka följande: a) inverkan av sprängämne med låg VOD, b) effekten av lokal sprickbildning c) inverkan av momentan respektive icke momentan initiering och d) inverkan av endast hjälparrad och konturrad (strossning medför mindre inspänd salva).

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Alla salvorna hade ett tvärsnitt på ca 21 $m^2$, 5,0 m håldjup, 4,5 m laddad hållängd. Siffrorna i *figur* 1 anger kapslarnas nummer. Varje nummer har en initieringstid som bestämts av kapselvalet för LP-kapslar eller vid förprogrammering vid användning av elektronikkapslar. Spränghålens påhugg och hålbotten var inmätt i x, y, z – koordinater i gruvans mätsystem av gruvmätningen. Nedan visas de fyra gråbergsalvorna.




***Figur 1**: Övre vänster: Konturen var laddad med $\phi_e$22 mm patroner K42 och hjälpare med $\phi_e$32 mm. Hålen var $\phi_h$48 mm. Övre höger: Konturen med $\phi_e$22 mm patroner K42 i $\phi_h$64 mm, hjälpare med $\phi_e$29 mm. Hjälparhålen var $\phi_h$48 mm. Nedre vänster: Konturen med $\phi_e$22 mm patroner K42 i $\phi_h$64 mm, hjälpare med K42 $\phi_e$29 mm. Hjälparhålen var $\phi_h$48 mm. Nedre höger: Konturen med $\phi_e$22 mm patroner Gurit i $\phi_h$64 mm, hjälpare med K42 $\phi_e$29 mm. Hjälparhålen var $\phi_h$48 mm.*

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

*Sprängämnen*

I malmförsöken laddades de fulladdade hålen med Kimulux R ett pumpbart icke sprängkapselkänsligt emulsionssprängämne. För upptändning användes en 17x135mm KP förstärkarpatron. Konturhålen laddades med strängad Kimulux R emulsion (ca 750 g/m) eller ϕ22 mm K42 rörladdningar. För upptändning av rörladdningarna användes en 200 mm stav av ϕ29 mm Gelatine Donarit 1.

I gråbergsförsöken användes förutom pumpemulsion de sprängämnen som visas i *figur* 1.

För upptändningen användes pyrotekniska Dynashoc LP sprängkapslar och Dynatronic elektroniksprängkapslar från DNAG eller en kombination av båda sorterna. Tekniska data för emulsionssprängämnena framgår av *tabell* 1 nedan.

***Tabell 1**: Tekniska data ur Kimits produktkatalog 1998 och ur Nitro Nobels 1994. Referens för Kimulux för vikt och volymstyrka är ANFO med packningsgraden 850 kg/m$^3$. Markering * för saknad tabelluppgift.*

| *Tekniska data* | *Kimulux R* | *Kimulux 82* | *Kimulux 42* | *Gurit 22* |
|---|---|---|---|---|
| Viktstyrka, % | 81 | 111 | 90 | * |
| Volymstyrka, % | 115 | 150 | 114 | * |
| Densitet kg/m$^3$ | 1200 | 1200 | 1100 | 1000 |
| Detonationshastighet, m/s | 5500 (ϕ=50mm) | 4600 | 5000 (ϕ=50mm) | 2000 (ϕ=17mm) |
| Gasvolym l/Kg | 906 | 778 | 874 l/kg | 930 |
| Energi Q, MJ/kg | 2,94 | 4,36 | 3,35 | 3,4 |
| Detonationstryck, GPa | 9,1 | 6,1 | 6,8 | * |

Skonsamma skrotningsmetoder

I Kirunagruvan används maskinskrotning med hydraulisk hammare som huvudmetod vid ortdrivning i malm. I anläggningsdrivningar i sidoberg djupare ner i gruvan används rivande skrotning då det högre bergtrycket orsakar smällbergsproblem vilket försvårar skrotning med hammare.

Att undersöka alternativa skrotningsmetoder är därför nödvändigt eftersom problemen med högre bergtryck även kan drabba drivningar i malm i takt med gruvans avsänkning.

Projektet kom att fokuseras mot utveckling av Vattenskrotningssystemet men även skrotning med roterande Fräshuvud dokumenterades.

Vattenskrotningen drevs som ett delprojekt där även SKANSKA och KGS (Kiruna Grus och Stenförädling) var delaktiga.

En avställd betongsprutningsrobot rustades upp och användes som bärare i försöken. Vattenpumpens maximala kapacitet var 220 bar vid ett flöde av 200 l/min

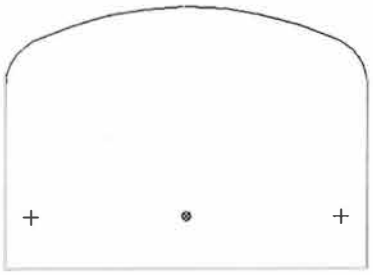
© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

## Resultat

Utarbetande av nya bredare ortprofiler

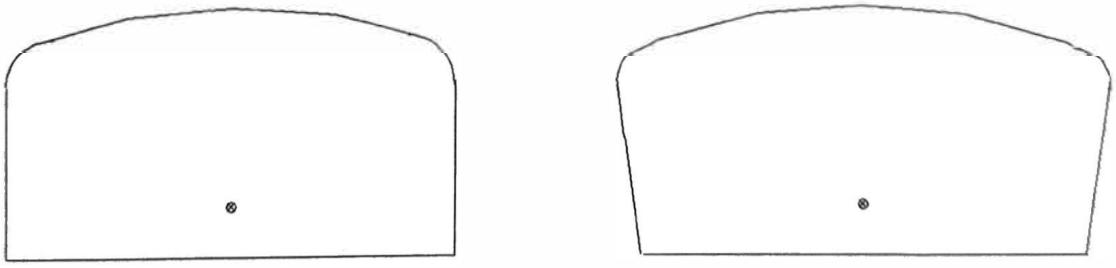
Som dimensioneringsunderlag för de nya tvärorterna utfördes fältförsök samt numeriska analyser. Fältförsöken bestod av deformationsmätningar, spänningsmätningar samt skadekartering i befintliga 7,0 meter breda tvärorter. Resultaten från mätningarna visade på mycket små deformationer samt få skador. För att teoretiskt bedöma stabiliteten i orterna användes de numeriska koderna PHASES, EXAMINE 2D samt EXAMINE 3D. Analyser utfördes för såväl brytning i enstaka orter samt för hur brytning påverkar närliggande orter.

Då det konstaterades att orterna under normala betingelser var stabila beslutades att bredda två befintliga orter till 11,0 meter genom strossning. Fortsatt stabila orter efter strossning medförde förfinad numerisk analys för att finna lämpliga geometrier för de nya orterna. Analyserna visade att med bibehållen pilhöjd kunde en breddning till 9,0 meter utföras. En breddning till 11,0 meter skulle kräva förändringar i pilhöjd för att undvika bergmekaniska störningar vid kommande avsänkning [5].



***Figur 2**: Standard tvärort med 7,0 m bredd. Area 32,8 m²*

Ny tvärort med 9,0m bredd Area 42.0 m² Ny tvärort med 9,0m bredd. Area 44.3 m²



***Figur 3**: Nya ortprofiler för ortdrivningsförsöket*

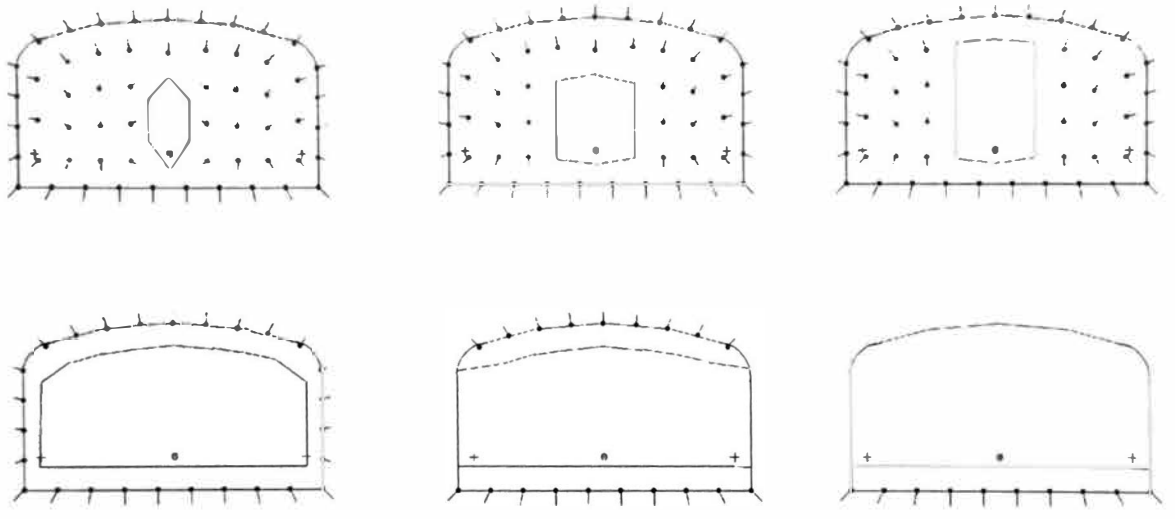
© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Breddningen motsvarade en ökning av utlastningsorternas area från 5 % till 8 % av skivrassalvornas totala volym.

Salvoptimering

Totalt testades åtta olika borr- och laddplaner i vardera ortprofil och område.
Optimeringen koncentrerades i huvudsak mot följande parametrar som var: antal borrhål, hålplacering, sprängämnesmängd, laddningskombinationer och upptändning.

För att kunna minska antalet hål under rådande förutsättningar testades en ny intervallfördelning vid sprängning av salvorna. Istället för det traditionella sättet att skjuta kil – strossrader – överdel - kontur skapades här en vertikal slits som täckte nästan hela gavelytan varefter strosshål/överdel sedan stegvis fälldes mot slitsen.



***Figur 4**: Ny initieringsföljd*

För att kontrollera om dessa förändringar orsakade rivningar mot konturen sköts några salvor i två steg där konturhålen lämnades kvar men inget onormalt upptäcktes

För att undvika stabilitetsproblem var det mycket viktigt att spränga skonsamt och minimera avvikelser från de teoretiska slutkonturerna. I konturhålen användes därför endast frikopplade laddningar i form av strängad emulsion eller rörladdningar kombinerat med elektroniska tändkapslar.

I område Söder med bättre berg fungerade momentan upptändning med elektroniska kapslar som förväntat och gav fler kvarstående borrpipor.

I område Norr med sämre berg kunde däremot ingen förändring i andel kvarstående borrpipor upptäckas vid övergång till elektroniska kapslar.

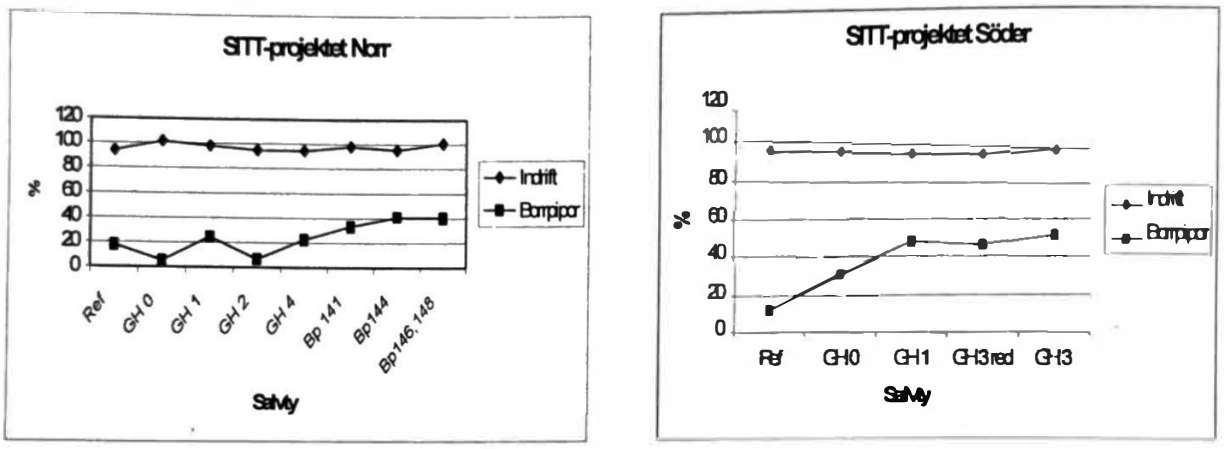
Tätborrning av kontur med halverat hålavstånd infördes där vartannat hål laddades och de oladdade hålen användes som ledhål för uppsprickningen. Detta förfarande

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

förbättrade också slutkonturen i tak och anfang men ingen förbättring i väggarna kunde utläsas. Inte heller reduktion av sprängämnesmängd i hålraden närmast kontur gav något förbättrat resultat. Därför tätborrades endast takdelen fortsättningsvis vid riktigt dåliga bergförhållanden. Det grova öppningshålet (250mm) påverkade indrifterna positivt oavsett förändringar i borr- och laddplaner.

Specifik laddning för salvorna sänktes totalt med 0,9 kg/m³ fast berg i Norra området och 0,6 kg/m³ fast berg i Södra området vilket innebar 100 – 150 kg mindre sprängämne per salva.

I område Söder med bra berg uppnåddes 98 % - 100 % indrift vilket överensstämmer väl med resultaten från tidigare försök med grova öppningshål [6].
I område Norr med sämre berg stabiliserades indrifterna vid 97 % - 100 % oavsett bergkvalité när grovhål infördes.




***Figur 5** : Förhållande mellan Indrift och synliga borrpipor*

Historiskt har andelen överberg varit cirka 5% högre i område Norr jämfört med område Söder. Anpassningen av borr- och laddplaner efter geologi har resulterat i att överberget stabiliserats runt 10 % i båda områdena.

## Odetonerade hål i salvorna

Serien med funktionskontroller omfattade 21 salvor med pyrotekniska eller elektroniska tändkapslar i konturen samt 5 salvor med elektroniska kapslar i alla hål. Resultaten visade att cirka 20 % av hålen inte kunde identifieras. I öppningsdelen där hålen ligger mycket nära varandra uppstår troligen en del överslagsinitieringar. I övriga hål är detonationsavbrott den troligaste orsaken till att registrering uteblivit.

## Bergskadeanalyser

Från nollförsöken i magnetitmalmen område söder, har vi kunnat bestämma våghastigheten i två riktningar utifrån 23 enkelskott med varierande kopplingsgrad 0,22-1,00. Tvärs mätorten kunde vi använda 20 stycken signaler och längs mätorten 105 stycken signaler. Dessa har sedan använts för skadeprognoserna. Bergets densitet och

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

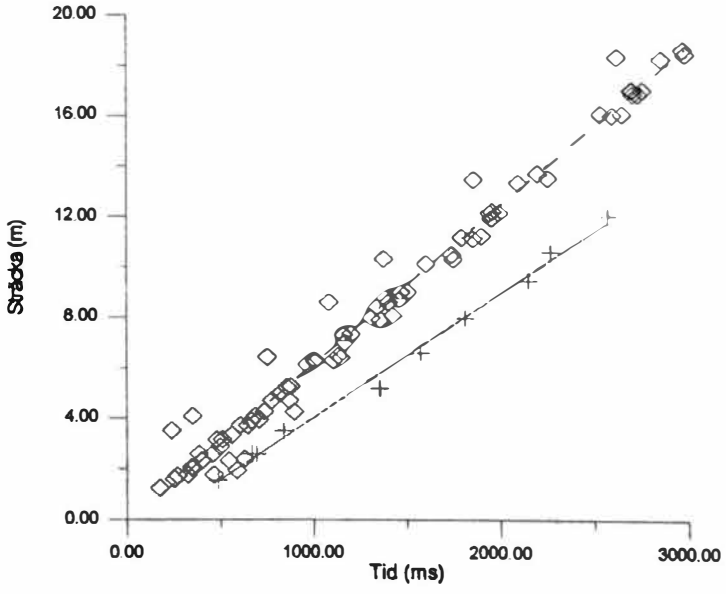
tryckhållfasthet var känd av gruvan. Tryck- och draghållfastheten togs från Lama och Vutukuri [7].

I gråbergsförsöken uppskattades ett värde på våghastigheten för syenitporfyr. Bergets densitet var känd och tryckhållfasthet togs från Lama och Vutukuri [7].

Under projektets ortdrivningsfaser registrerades accelerationssignaler från 6 stycken salvor i malm och 4 stycken salvor i gråberg. I malmen kunde 79 stycken integrerade accelerationssignaler användas till analysen från salvorna 3 och 5. I gråberget kunde 48 stycken signaler användas sammanslagna från de 4 salvorna. Det är huvudsakligen strosshålen och konturhålen nära mätpunkterna som använts för skadeprognoser.

*Nollförsök i malm*

I enskottsförsöken i malmen utfördes bland annat sträcka- tid mätningar. Detta resulterade i två linjer som gav våghastigheterna för respektive mätriktning. Dessa beräknades från 13 av de 16 nollförsöken som gjordes i riktning längs mätorten och från två försök tvärs mätorten. Hastigheterna beräknades till 6273 m/s för mätningar längs ort 406 (fyrkanter) och 4881 m/s tvärs ort 406 (kryss). Hastigheterna skiljer sig åt med ca 22 %.




***Figur 6**: Figuren visar linjepassning för beräkning av våghastigheten c i två riktningar approximativt vinkelrätt varandra. Kvadraterna representerar mätningar längs mätorten med 84 stycken värden och $r^2 = 0,98$ och tvärs mätorten med 10 stycken värden och $r^2 = 0,99$.*

När det gäller skadeprognoserna visade minsta kvadratpassning till signalerna att platskonstanterna kunde bestämmas för de två mätriktningarna. Vi kunde använda 20 stycken signaler tvärs mätorten och 105 stycken signaler längs mätorten.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

*Ortdrivning i malm*

Först visade passningsräkningarna att platskonstanterna blev ungefär lika stora för salvorna 3 och 5. Därför kunde signalerna från dessa salvor slås samman till sammanlagt 79 stycken signalerna. Därefter beräknades igen platskonstanterna.

*Slutresultat malm*

Efter jämförelser av resultaten från nollförsöken med resultaten från ortsalvorna kunde alla mätningar tvärs mätorten slås samman till 99 stycken signaler och längs mätorten till 105 stycken signaler för slutlig bestämning av platskonstanter. Den första ekvationen som baseras på arbetet av Holmberg och Persson [1], kan skrivas:

$$PPV = A\cdot(g(H)\cdot Q)^{\alpha}\cdot R^{\beta}\cdot f^{2\cdot\gamma}\cdot\eta^{\delta} \qquad (1)$$

Här är konstanterna interceptet A , sprängämnesexponenten $\alpha$ och avståndsexponenten $\beta$. Förutom de tre första konstanterna har en frikopplingsexponent $2\gamma$ med kopplingsgraden $f = \phi_e/\phi_h$, Atchison [8], kunnat läggas till i den ursprungliga ekvationen. Sprängämnesmängden bestäms av Q och avståndet från laddning av R. De tre första konstanterna i ekvation (1) karakteriserar mätplatsens geologi. Den fjärde beskriver den reducering av sprängskador som uppnås genom att låta laddningarna vara mindre än spränghålet d v s frikopplade. Konstanten $\delta$ sist i uttrycket $\eta^{\delta}$ beskriver beroendet av en frivolym med avståndet L mellan laddningen och hålbotten. Uttrycket lyder $\eta(L)=1/(1+L/H)$. För laddningslängdskorrektionen g (H) som har förenklats av Ouchterlony m fl [9] gäller att:

$$g(H)=\text{atan}(H/2R)/(H/2R) \qquad (1.1)$$

med H som laddningslängd.

Den andra ekvationen baseras på arbetet av Hustrulid [2] . Ekvationen lyder:

$$PPV=0{,}61\bullet(P_h/\rho\bullet c)\bullet(\phi_h/R)\exp(-I\bullet R/0{,}61\bullet\phi_h) \qquad (2)$$

Här är dämpningskonstanten I och akustiska impedansen för berg $\rho \bullet c$, platskonstanter. De aktuella variablerna är spränghåltryck $P_h$ och avstånd R mellan laddning och mätpunkterna. Accelerationssignalerna antas komma från den punkt (enhetssfär) i spränghålet som ligger närmast mätpunkten. Om en enhetssfär med diametern b ersätts med en cylinder med diametern $\phi_h$ och höjden 2b så kan enhetssfären skrivas som $0{,}61\phi_h$, som i ekvation 2.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Borrhålstrycket kan approximativt skrivas:

$$P_h = P_e f^{2\gamma} \quad (2.1)$$

Explosionstrycket $P_e$ beräknas utifrån två mätbara kvantiteter, explosivämnets täthet $\rho_e$ och detonationshastigheten VOD:

$$P_e = \rho_e (VOD)^2/8 \quad (2.2)$$

Kopplingsgraden är $f = (\phi_e/\phi_h)$ som tidigare.

Parametervärdena beräknades slutligen för att kunna användas för skadeprognoserna. För skalningslagen gäller att förenklingen $\alpha=\beta/2$ d v s $R^\alpha/Q^\beta \approx (R/\sqrt{Q})^\beta$ Tabellerna nedan visar värdena.

***Tabell 2**: Slutlig bestämning av parametrar efter sammanslagning av nollförsök och ortsalvor.*

Holmberg och Persson

| *Riktning* | *A m/s* | $\alpha$ | $-\beta$ | $2\gamma$ | $\delta$ | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tvärs mätort | 0,83± 0,26 | 0,79± 0,12 | 1,75± 0,16 | 0 | 0 | 0,83 |
| Tvärs mätort, Skalningslagen | 0,72± 0,13 | $\alpha=\beta/2$ | 1,71± 0,15 | 0 | 0 | 0,83 |
| Längs mätort | 0,36± 0,19 | 0,47± 0,31 | 0,91± 0,18 | 0,38± 0,56 | 0 | 0,60 |
| Längs mätort, Skalningslagen | 0,36± 0,14 | $\alpha=\beta/2$ | 0,91± 0,18 | 0,39± 0,38 | 0 | 0,60 |

***Tabell 3**: Här hålls A fritt eller givet av 0,61 $P_e$, $/\rho c$ och dämpningen är I.*

Hustrulid

| *Riktning* | *A* | *I* | $2\gamma$ | $\delta$ | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| tvärs mätort, fritt | 3,78±0,28 | -0,10±0,03 | 1,57±0,46 | 0 | 0,71 |
| tvärs mätort, givet $P_e, \rho, c$ | 4,77 | -0,19±0,02 | 2,37±0,48 | 0 | 0,76 |
| längs mätort, fritt | 2,00±0,33 | 0,01±0,03 | 1,10±0,39 | 0 | 0,61 |
| längs mätort, givet $P_e, \rho, c$ | 4,16 | -0,12±0,04 | 2,55±0,56 | 0 | 0,68 |

*Gråberg*

På samma sätt som för malmen beräknades parametrarna och därefter prognoskurvorna utifrån en sammanslagning till 48 stycken PPV- signaler. Några skillnader från malmförsöken finns dock. Dessa är för det första att några nollförsök inte bedömdes nödvändiga främst för att överensstämmelsen mellan dessa och ortdrivningsförsöken för malmen var tillräckligt god, och för det andra att vi antar ett värde för

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

ljudvågshastigheten c=5847 m/s för syenitporfyr som ett medelvärde oberoende av mätriktning. För densiteten ρ gäller enligt LKAB att ρ = 2714 kg/m$^3$.

Från salva 1 kunde vi använda 7 hål av 15 inmätta d v s 7/15, för salva 2, 4/11, för salva 3, 10/16 och för salva 4, 4/13 stycken hål. Inmätning var gjord på både vänster och höger sida men de användbara hålen för prognoserna var koncentrerade till höger sida d v s nära mätpunkterna.

***Tabell 4**: Parametrar från ortsalvorna 1-4 mätning tvärs mätort.*

Holmberg och Persson, tvärs mätort

| *Parametrar* | *A (m/s)* | $\alpha$ | $-\beta$ | $2\gamma$ | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0,61 ± 0,41 | 0,87 ± 0,33 | 1,42 ± 0,32 | 0 | 0,65 |
| Skalningslagen | 0,84 ± 0,55 | $\alpha=\beta/2$ | 1,39 ± 0,34 | 0,31±0,66 | 0,65 |

***Tabell 5:** Bestämningar av parametrar ur salvorna 1-4 tvärs mätort.*

Hustrulid, tvärs mätort

| *Parametrar* | *A m/s* | *I* | $2\gamma$ | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|
| Fria | 4,09 ± 0,62 | -0,05 ± 0,06 | 1,73 ± 0,62 | 0,67 |
| Givet $P_e$, ρ, c | 5,32 | 0,14 ± 0,04 | 2,61 ± 0,37 | 0,73 |

*Prognoser*

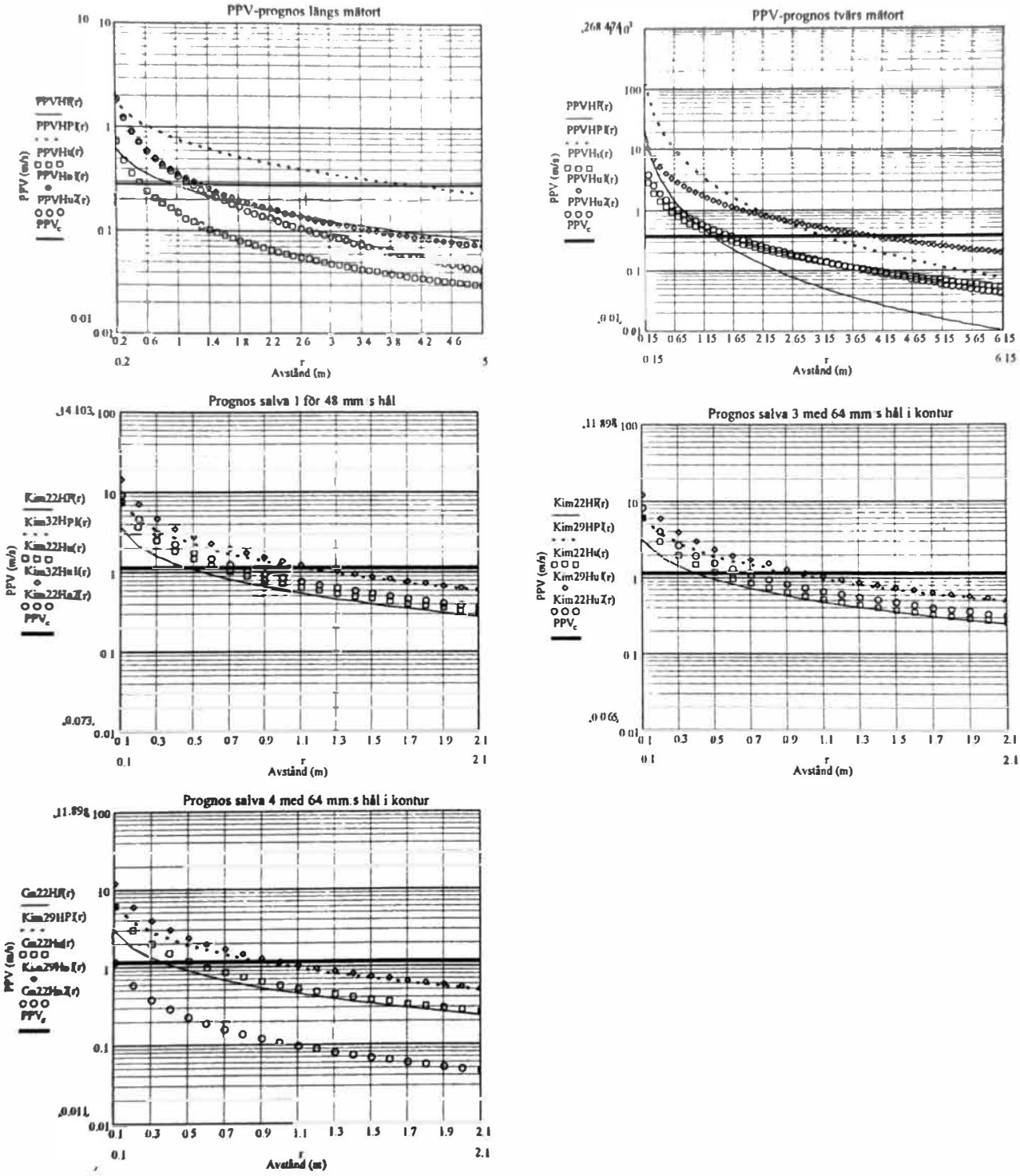
För att göra prognoser måste man anta något om bergets hållfasthet för dragspänningar. Mekaniska förhållanden som orsakar skador i berget d v s töjningen $\varepsilon_b$ kan beskrivas som $\varepsilon_b$ = PPV/c [1]. I en rapport av Bjarnholt och Skalare [10] visar mätningar att töjningen vinkelrät mot vågutbredningsriktningen är proportionell mot PPV inom ett intervall av approximativt 1/3 period. Detta och att berget kan karakteriseras medför att $PPV_c$ kan uppskattas.

För malmen gäller att genomsnittlig tryckhållfasthet $\sigma_c$ = 120 MPa (gruvan), att densiteten ρ = 4800 kg/m$^3$ (gruvan) och att seismiska hastigheten $c_{s1}$ = 6273 m/s respektive $c_{s2}$ = 4881 m/s (egna mätningar). Om vi ansätter att draghållfastheten $\sigma_t$ är 7 % av tryckhållfastheten $\sigma_c$ så kan $PPV_c$ i riktningarna längs mätort och tvärs mätort uppskattas med hjälp av uttrycket $PPV_c = \sigma_t/(\rho \cdot c)$ där c = $c_{s1}$ eller $c_{s2}$. Detta ger att $PPV_c$- nivån kunde uppskattades till 0,36 m/s tvärs mätorten och till 0,23 m/s längs mätorten.

På samma sätt som i malmen bestämdes $PPV_c$- nivån till 1,1 m/s för syenitporfyren.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Prognoser har tagits fram för konturhål och hjälparhål. *Figur* 7 nedan visar prognoser tvärs och längs mätorten för magnetiten och tvärs mätorten för gråberget. Prognoserna benämns PPVHP för Holmberg och Persson respektive PPVHu för Hustrulid. Resultaten visas nedan.




***Figur 7**: Två övre bilderna från malmens konturhål med Q=1,9 kg K42, $\phi_e$22/ $\phi_h$48 mm (PPVHP, PPVHu, PPVHu2) och stross med Q=10,2 kg $\phi_h$48 mm (PPVHP1, PPVHu1). Tre nedre bilderna är från gråbergets konturhål och hjälpare. (En horisontell linje visar nivån för kritisk partikelhastighet $PPV_c$. Skärningen mellan prognosen och horisontella linjen anger skadedjupet $R_c$.*

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

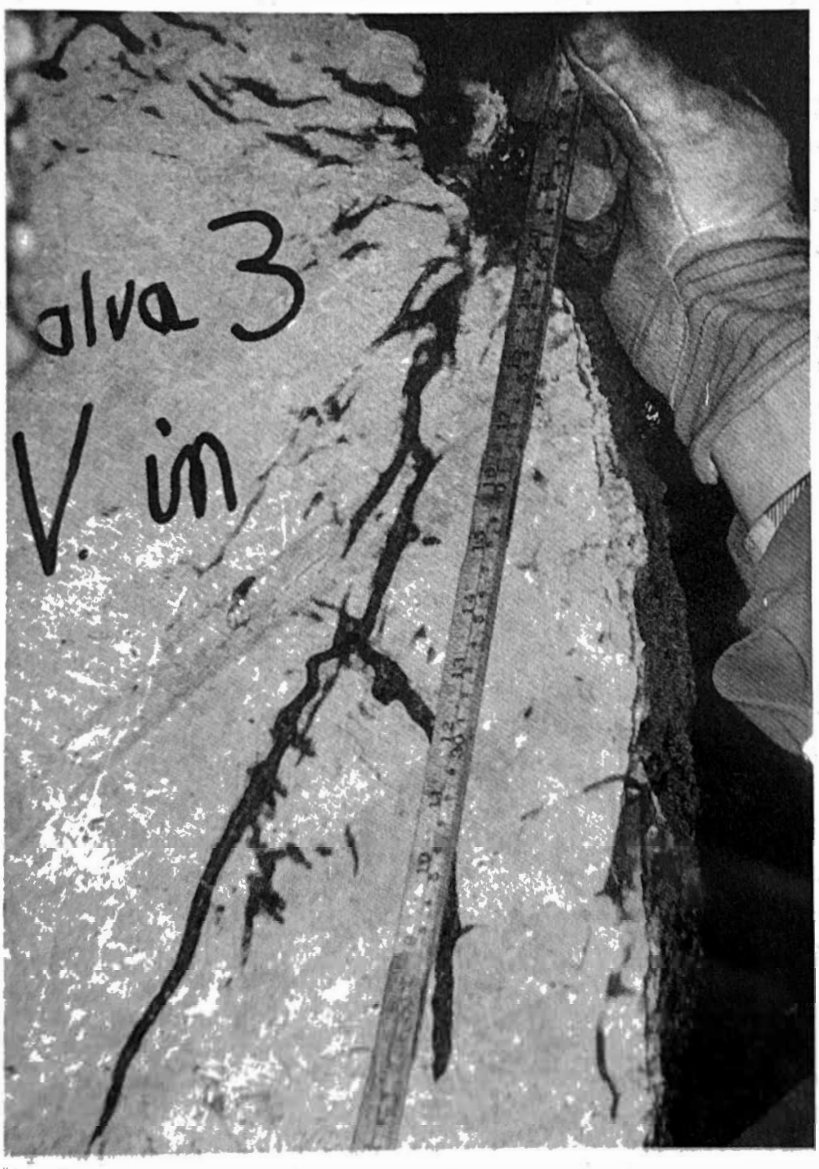
## Sprickkartering

*Malm*

Utvärderingen av sprickkarteringen blev svårtolkad [11]. Malmen var mycket söndersprucken i försöksområdet. Den var grovkorning och strukturen påminde om pegmatit. Det fanns också sprickor vinkelrät mot väggen och det var svårt att säga om dessa kom från den aktuella sprängningen eller om de fanns tidigare. Sammantaget var sågsnitten svårtolkade och de vanliga sprängningsrelaterade sprickorna som kan hittas i t ex Vångagranit var svåra att finna.

*Gråberg*

Även gråberget visade sig vara uppsprucket viket gjorde utvärderingen svår. På några ställen i konturen fanns tydliga sprickor och *Figur* 8 visar dessa från ett konturhål i salva 3.




***Figur 8:*** *Sågsnitt i höger vägg salva 3*

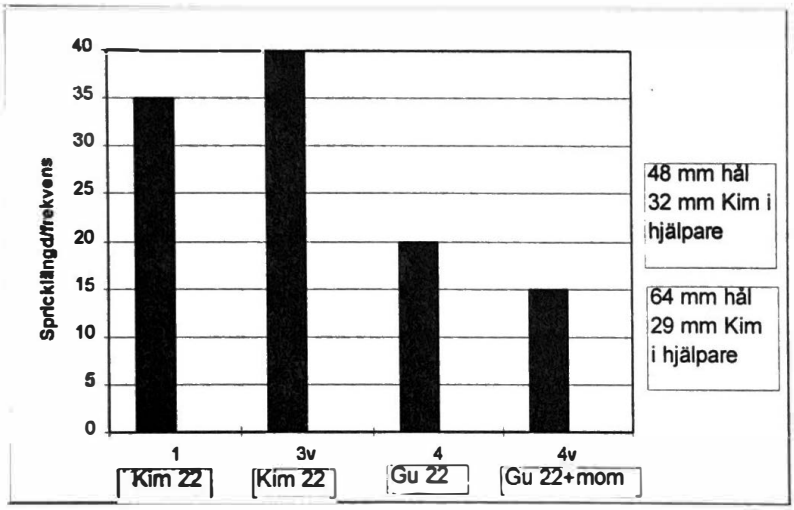
© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Uppsprickningen mellan hålen är troligen en kombination av naturlig sprickbildning samt skador från strosshål och öppningshål. Skrotningen rev tyvärr bort en del av de synliga halvpiporna. I *tabell 6* visas en sammanställning.

***Tabell 6**: Spricksammanställning*

| *Salva* | *Håldim kontur (mm)* | *Laddn. hjälpare* | *Laddn. kontur* | *Initier.* | *Max l. (cm)* | *Antal radiella spricko r* | *Sprickfrekvens Antal* | *Längd (cm)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 48 | 32 mm Kim | 22 mm Kim | ej mom | 35 | 2 | 20 | 130 |
| 3 vä | 64 | 29 mm Kim | 22 mm Kim | ej mom | 40 | 5 | 15 | 170 |
| 4 hö | 64 | 29 mm Kim | 22 mm Gu | ej mom | 20 | 3 | >30 | >200 |
| 4 vä | 64 | 29 mm Kim | 22 mm Gu | mom | 15 | 3 | >50 | >250 |

I *figur* 9 visas maximala spricklängden.




***Figur 9:** Det framgår att spricklängderna blev kortast med momentan upptändning och gurit i konturen.*

I *tabell 7* nedan visas salvorna, prognoserna och maximala spricklängden.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

***Tabell 7**: Jämförelser av förutsagda skador med uppmätta spricklängder. Krysset i Hustrulids kolumn markerar att interceptet för ekvationen varit givet från mätningar av VOD och sprängämnets densitet samt beräkningar av spränghålstrycket.*

| *Salva* | *Sprängämne/ Håldiameter* | *Skador Holmberg och Persson m* | *Skador Hustrulid m* | *Uppmätta spricklängder i konturen m* |
|---|---|---|---|---|
| 1 Kontur | Kim22/ϕ48 | 0,6 | 0,7, 0,9* | 0,35 |
| 1 Hjälpare | Kim32/ϕ48 | 1,3 | 1,3 | - |
| 3 Kontur | Kim22/ϕ64 | 0,5 | 0,6, 0,7* | 0,40 |
| 3 Hjälpare | Kim29/ϕ48 | 1,1 | 1,1 | - |
| 4 Kontur | Gu22 / ϕ64 | 0,5 | 0,6, 0,12* | 0,20 |
| 4 Hjälpare | Kim29/ϕ48 | 1,1 | 1,1 | - |

*Skonsamma skrotningsmetoder*

Skrotningsförsöken koncentrerades i huvudsak till utveckling av Vattenskrotningssystemet men även skrotning med roterande Fräshuvud dokumenterades och utvärderades. Ordinarie skrotningsmetod med hydraulisk hammare användes som referens.

Utvärderingen omfattade volym nerskrotat berg, skrotningstid per salva samt skrotningsindrift.

***Tabell 8**: Medelvärden skrotning*

| Metod | Nerskrotad volym ($m^2$) | Tid per salva | Skrotningsindrift (m) |
|---|---|---|---|
| Hammare | 4,5 | 2,8 | 0,16 |
| Fräshuvud | 3,2 | 1,5 | 0,18 |
| Vatten | 3,2 | 2,8 | 0,08 |

*Roterade Fräshjul*

Fördelar:

- Snabb avskrotning
- Fungerar mycket bra i småslagigt och poröst berg
- Enkelt att rensa undan nerskrotade massor

Nackdelar:

- Fungerar inte bra vid storslagigt berg, svårt att få loss större block
- Svårt att skrota rent i skarven mellan tak/vägg och gavel
- Stor bärare krävs för att klara belastningarna
- Tveksam förarmiljö med kraftiga ryck och skakningar när Fräshjulet fastnar eller glider undan från bergytan.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

- Kraftig dammbildning
- Bitsen slits ojämnt, om ett bits försvinner måste det ersättas av ett nytt med samma längd som de övriga för att inte skapa obalans.

*Vattenskrotning:*
Fördelar:
- Fungerar mycket bra vid småslagigt och poröst berg
- Skapar ett mycket rent underlag för ev. sprutbetong = bättre vidhäftning
- Låga drifts- och underhållskostnader

Nackdelar:
- Fungerar inte bra vid storslagigt berg
- Svårt att skrota gaveln

Ingen direktkontakt med underlaget vilket gör det svårt att veta om något parti är "bomt".

Att Vattenskrotning skapar ett mycket bra underlag för betongsprutning vidimeras i nedanstående serie vidhäftningsprover.
Notera också vattentryckets inverkan på vidhäftningsresultatet och antal prover där vidhäftning helt saknas [12].

***Tabell 9**: Vattenskrotning*

| Typ av tvättning | Vattentryck | Antal test | Vidhäftning (Mpa) | % test med 0 vidhäftning |
|---|---|---|---|---|
| Std metod | 7 kg | 41 | 0,21 | 36 |
| Högtryckstvätt | 150 kg | 14 | 0,33 | 17 |
| Vattenskrotning | 200 kg | 24 | 0,61 | 7 |

**Slutsatser**

Drivningen av de bredare orterna har gått relativt problemfritt. Förstärkningsinsatserna i område Norr med sämre berg är större jämfört med övriga orter. Förstärkningen består i huvudsak av oarmerad sprutbetong.

I område Söder avviker inte förstärkningsinsatserna från övriga orter. Här består förstärkningen i huvudsak av bergbult.

Om och var i gruvan de bredare orterna i framtiden ska finnas, bestäms av hur provområdena påverkas bergmekaniskt vid kommande utbrytning samt om utlastningen påverkas positivt.
Vid konstruktionen av borr- och laddplaner har optimal borrnings- och laddningsmängd i förhållande till resultaten från bergskadeanalyserna överskridits. En säkerhetsmarginal har byggts in eftersom en 100%-ig funktion inte kan garanteras. Optimeringen har dock

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

medfört att slutkonturerna förbättrats och sprängämnesmängden minskats i områdena jämfört med utgångsläget.

Tätborrning av takdelen i dåligt berg ger bra slutkonturer även vid längsgående strukturer.

Momentan upptändning med elektroniska tändkapslar i kontur ger bättre slutkontur i normalt berg. I sämre berg måste förändringar i borr- och laddplan typ tätborrning utföras för att uppnå önskat resultat. Att använda elektroniska tändkapslar i hela salvan om inga vibrationskrav föreligger är inte försvarbart dels ur kostnadssynpunkt men också på grund av tveksamheter i funktion.

Utvärderingen av skrotningsmetoderna visar att samtliga metoder har begränsningar. Slående skrotning är enda metoden som fungerar tillfredsställande i storslagigt berg. I dåligt berg fungerar de båda alternativa metoderna bra. Vattenskrotning ger förbättrad vidhäftning vid efterföljande betongsprutning men ytterligare utveckling av tekniken är nödvändig.

Verifiering av skadeprognoserna kunde utföras i gråberget men tyvärr inte i malmen. Detta berodde huvudsakligen på att mätpunkterna och sågsnitten ej låg i samma läge, för få kvarvarande borrhålshalvpipor, berget var mycket svårt att sprickkartera och momentant sprängd kontur var ej möjlig att skadebestämma utifrån PPV- värden.

*Skadeprognoser i malm*

Tillförlitlighet i mätningar: Accelerationssignalerna kan variera en hel del och sortering måste utföras. Trots detta får vi rätt låga $r^2$ –värden, se *tabell* 2, 3, 4 och 5. Man bör alltså mäta betydligt mer än vad som kommer till användning.

Sammanslagning av mätningar: En sammanslagning av signaler visade sig möjlig i riktning tvärs mätort respektive längs mätort. Detta gav ett underlag av 99 stycken PPV-värden respektive 105 stycken PPV- värden. Det behövs sannolikt inte fullt så många signaler för beräkning av platskonstanter som använts här.

Prognoser och sprängskador: Ekvationsparametrarna har varierat en hel del beroende på hur problemet formulerats och på mätriktningen. Det är alltså svårt att välja ekvation och parametrar och varje ny geologi och drivningsriktning kan kräva en specifik parameterbestämning. De karterade sprickorna var mycket svårtolkade i malmen och någon verifiering bedömdes inte möjlig.

Påverkan av förkastningar, skölar och slag: Allmänt gäller för Holmberg och Perssons ekvation att skalningslagen kan användas och att avståndsdämpningen hos PPV - värdena var större i riktning tvärs mätort. Från räkningar med Hustrulids ekvation framgår att dämpningen är störst tvärs mätort.

Utbredningshastighet: Våghastigheten har bestämts utifrån enskottsmätningar. Skillnaden mellan de två vinkelräta riktningarna är 22 %. Den högre hastigheten var

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

uppmätt längs mätort och subparallellt med förkastningar, skölar och slag. Detta stråk genom försöksområdet har sannolikt gett upphov till den lägre utbredningshastigheten.

Momentan respektive icke momentan initiering: När det gäller momentan respektive icke momentan initiering av spränghålen så visade sig en enkel jämförelse av effekten på PPV-värden svår att genomföra. Detta främst beroende på att en momentan initiering ger överlagrade vågpulser i mätpunkterna och att dessa är svåra att utvärdera på sedvanligt vis.

*Gråberg*

I gråberget har vi förutom prognoser tagit upp sågsnitt för verifiering av skador i ortkonturen.

Sammanslagning av mätningar: Någon jämförelse som för malmen av platskonstanterna från de enskilda salvorna var inte möjlig huvudsakligen på grund av för få signaler per salva. Signalerna från salvorna 1, 2 ,3 och 4 har slagits samman till totalt 48 stycken integrerade 3D- accelerationssignaler. Detta bedöms tillräckligt för skadeprognoserna.

Prognoser och sprängskador: En något enklare analysgång kunde användas här jämfört med malmförsöken främst för att några nollförsök inte utförts. Gråberget var lättare att kartera än malmen. Vi kunde kartera 5 stycken snitt, se *figur* 9.

Karteringarna har visat att skadorna som kunde förutsägas av prognoserna i några fall stämde väl med spricklängderna. De kortaste spricklängderna uppmättes för salva 4 vänster sida som initierats momentant i ortkonturen. Man bör alltså ifrågasätta sambanden mellan PPV och spricklängder.

Från karteringen syns tydliga sprickor som inte verkar komma från konturen. En förklaring kan vara att hjälparhålen, strosshålen och kilhålen ger skador som överlagrar de från konturhålen. En annan förklaring kan vara att sprickorna är naturliga.

Underlaget från sprickkarteringen i gråberget är också litet och några säkra slutsatser kan inte dras om någon prognosekvation skulle passar bättre för att förutsäga skador.
Analysen av Hustrulids ekvation tyder emellertid på att spränghålstrycket, bergdensiteten och våghastigheten har betydelse för bestämningen av bergets dämpning om man jämför med att låta dessa parametrar vara fria, se *tabell* 3. För övrigt så stämmer prognoserna från de två ekvationerna rätt bra överens för gråberget och sämre för malmen.

Fortsatta försök kan därför rekommenderas som ytterligare klarlägger vilka skador som uppstår vid sprängning.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

## Referenser


1. Holmberg, R and P A, Persson, 1980: "Design of tunnel perimeter blasthlole patterns to prevent rock damage", Trans Inst Mining and Metallury vol. A, pp 37 – 70, London

2. Hustrulid, W, R, Bennet, F, Ashland and M, Lenjani, 1992: "A new method for predicting the extent of the blast damage zone", in Proc Blasting Conference, paper no. 3, Nitro Nobel, Gyttorp, Sverige.

3. Olsson, M, I, Bergkvist 1997:"Sprickutbredning i berg vid skonsam sprängning", SveBeFo Rapport 32, Stockholm, Sverige.

4. Andersson, P, 1992: "Skadezon vid tunneldrivning, Seminarium oktober 1992", SveBeFo Rapport 8, sida 2, Stockholm

5. Lundman, P,1999,"Bergmekaniska aspekter på tvärorter i Kirunavaaragruvan", SveBeFo-rapport 36, Stockholm.

6. Fjellborg, S, M, Olsson, 1996: "Grovhål i centrum, ortdrivning med grovt öppningshål i LKAB", SveBeFo rapport 27, Stockholm, Sverige.

7. Lama, R D, V S, Vutukuri, 1978,"Mechanical Properties of Rocks", vol. 2, Trans. Tech. Publications, Germany

8. Atchison, T C, W I, Duval and J M, Pugliese, 1964: "Effect of decoupling on explosion –generated strain pulses in rock", US Bu Min, report RI6333, Twin Cities MN.

9. Ouchterlony, F, C, Sjöberg and B A, Jonsson, 1993:"Blast damage predictions from vibration measurements at the SKB underground laboratories at Äspö in Sweden", in Proc 9th Ann Symp on Explosives and Blasting Research, pp 189-197, ISEE, Cleveland, OH

10. Bjarnholt, G, H, Skalare 1981:"Instrumenterad bergsprängning –inledande försök i betongblock", SveDeFo rapport DS 1981:16, Stockholm, Sverige

11. Nyberg, U, S, Fjellborg, M, Olsson, F, Ouchterlony, 1999,"Bedömning av sprängskador i ortkontur", Rapport K10, SveBeFo, Stockholm.

12. Malmgren, L, Svensson, 1998,T,: Investigation of Important Parameters for Unreinforced Shotcrete as Rock Support in the Kiirunavaara mine, Sweden.

13. Ouchterlony, F, M, Olsson, 2000,"Dags att komplettera befintlig skadezonstabell", föredrag vid Bergsprängningskommiténs diskussionsmöte BK-2000. BK2000.