

BEDÖMNING AV SPRÄNGSKADOR I ORTKONTUR

Vibrationsmätningar, skadeprognoser och sprickkartering i magnetitmalm och gråberg

Ulf Nyberg

Stig Fjellborg

Mats Olsson

Finn Ouchterlony

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

BEDÖMNING AV SPRÄNGSKADOR I ORTKONTUR

**Vibration measurements, damage predictions
and crack mapping in magnetite ore and
waste rock.**

Ulf Nyberg
Stig Fjellborg
Mats Olsson
Finn Ouchterlony

SveBeFo Rapport 50

Stockholm 2000
ISSN 1104-1773
ISRN SVEBEFO-R--50--SE

FÖRORD

I LKABs gruva i Kiruna pågår ett utvecklingsarbete för att anpassa ortdrivning och skivrasborring till de geologiska förhållandena i olika delar av gruvan, detta som ett led i effektiviseringen av malmbrytningen som sker på allt djupare nivåer. Bland annat provas ökade ortareor med krav på bättre stabilitet, vilket i sin tur kräver skonsam sprängning som kan leda till minskad skrotning och begränsa förstärkningsinsatserna. LKABs intresse av att undersöka effekterna av skonsam sprängning sammanfaller till stor del med SveBeFos mer allmänna mål att förstå och behärska sprickutveckling vid sprängning och jämföra praktiska resultat med teoretiska och empiriska modeller för skadezonen i kvarstående berg.

Denna slutrapport redovisar resultaten från fältförsök som utförts i malm och gråberg och är gemensamt finansierade av SveBeFo och LKAB. Mats Olsson har varit projektledare och Stig Fjellborg koordinator från LKABs sida. Fältarbetena har huvudsakligen genomförts av Ulf Nyberg, som också är huvudförfattare till rapporten. En referensgrupp har följt projektet, fram till 1998 under ordförandeskap av Bill Hustrulid, LKAB, därefter Jan-Olof Nilsson, LKAB.

Projektet har bidragit med ökade kunskaper om skadezonen och därmed för de standardtabeller som idag används för att bedöma denna vid tunnelsprängning med olika sprängämnen. Försöken att utvärdera prognosmodeller för att förutsäga skadebilden har visat att modellerna ännu inte är helt färdiga att användas för optimering av laddning, vilket är ett övergripande mål. Bland annat behöver beskrivningen av sprängämnens egenskaper som indata till modellerna förbättras.

Delrapportering har skett bland annat vid "Bergsprängningskommittén diskussionsmöte 2000" i Stockholm och vid "The 1st world conference on explosives & blasting technique" München, 2000.

Stockholm den 3 oktober 2000

Tomas Franzén

SUMMARY

During the period 1997-99 SveBeFo carried out a project in co-operation with the LKAB mine in Kiruna northern Sweden. The problem was formulated as: *1) testing models for estimation of blast damage in the drift contour in different geology based on acceleration data in the rock, 2) verification of the damage by inspection of saw cuts across half casts in the contour.*

The used two equations for prediction of vibrations were a scaling law (Holmberg & Persson 1980) and a damping law (Hustrulid et al 1992). The laws predict peak particle velocities (PPV) at different distances from a single explosive charge. The two laws were slightly modified and used together with a criterion for rock damage. Measuring the radial cracks in saw cuts (Olsson & Bergqvist 1997) carried out the verification.

In the field test at a depth of 750-800 m, in ore and waste rock, explosive parameters were varied as well as the coupling ratio (charge diameter/blast hole diameter). The vibration signals (two or three components) were recorded close to the blast at 3-7 stations depending on the test.

Geological mapping shows that the ore is foliated and a dominating stress direction is sub parallel to the drift. This may explain the 20% lower wave velocity and the higher rock damping across the drift. Blast related cracks were difficult to identify visually however. On the other hand an intense pattern of cracks was observed in the saw cuts.

The results from waste rock tests are a comparison of the radial cracks with the estimated damage zone depth in the contour. The comparison shows that the predictions are too large for both laws. The damping law predictions for Gurit are an exception.

The most striking difference between the two laws is their sensitivity to explosive properties. The damping law contains the bore hole pressure and predicts 5-6 times deeper damage from $\phi 22$ mm Kimulux than from $\phi 22$ mm Gurit. The scaling law contains the charge weight and predicts only a slight difference. The measured ratio in the waste rock lies in between these extremes. It is a factor of 2. Previous results in granite give 1,7 (Olsson & Bergqvist 1996).

The choice between the damping law and the scaling law to predict blast damage has not been settled with this investigation. The report shows that more work will be needed to get a better description of the explosives and to improve the laws. It also shows the need of a better definition of the term blast damage.

SAMMANFATTNING

Under perioden 1997-99 har SveBeFo genomfört ett projekt i samarbete med LKABs gruva i Kiruna. Kärnproblemen och huvudmålen kan formuleras: 1) att bedöma skador i ortkonturen vid ortdrivning i olika geologier med hjälp av prognoser baserade på accelerationsmätningar (m/s^2) i berget, 2) att verifiera skadorna genom att kartera sågsnitt tvärs halvpipor i ortkonturen.

I projektet har vi utgått från två svängningshastighets eller PPV-ekvationer. Dessa, dels den så kallade skalningslagen (Holmberg & Persson 1980) dels den så kallade dämpningslagen (Hustrulid m fl 1992) kan förutsäga den maximala svängningshastigheten PPV (m/s) på olika avstånd från en laddning. Båda lagarna har modifierats något. Tillsammans med prognoserna används ett skadekriterium för malmen och gråberget. Verifieringen har utförts genom att mäta antalet radiella sprickor, sprickfrekvens och spricklängder (m) samt maximala spricklängder (m) med en metod utarbetad på SveBeFo (Olsson & Bergqvist 1997).

I fältförsöken som genomfördes på ca 750-800 m djup i malm och i gråberg, varierades sprängämnesparametrar och frikoppling (förhållandet laddningsdiameter/spränghålsdiameter). Vibrationssignalerna (två eller tre komponenter) mättes upp nära sprängladdningarna vid 3-7 mätpunkter beroende på försöket.

Geologisk kartering av malmen har visat att foliationer ligger nära parallellt med drivningsorten liksom huvudspänningsriktningen. Detta kan förklara den ca 20% lägre vågutbredningshastigheten och större dämpningen tvärs orten. Man kan konstatera att sprängrelaterade radiella sprickor ut från konturhålen var svåra att urskilja. I stället uppträdde ofta naturliga sprickor (som i pegmatit) i mönster över stora delar av sågsnittet.

Huvudresultaten från försök i gråberg visas i form av en jämförelse mellan skadeprognoser och uppmätta spricklängder i sågsnitt tvärs halvpipor i ortväggen.

De uppmätta spricklängderna är kortare än de förutsagda för båda lagarna. Ett undantag är för sprängämnet Gurit med dämpningslagen. De absolut kortaste sprickorna uppkom som väntat vid momentant initierad kontur, men PPV-lagarna kunde inte användas i detta fall.

En av de viktigaste resultaten är de två lagarnas känslighet för sprängämnesegenskaperna. Dämpningslagen, som innehåller borrhålstrycket förutsäger 5-6 gånger djupare skador från Kimulux än från Gurit med diametern $\phi 22$ mm. När det gäller skalningslagen som innehåller sprängämnets vikt är skillnaden liten. De uppmätta sprickorna är ungefär två gånger längre för Kimulux. Tidigare försök i granit har visat att värdet kan vara 1,7 (Olsson & Bergquist 1996).

Rapporten visar att mer arbete återstår med att beskriva sprängämnen och att förbättra prognoslagarna. Den visar också på ett behov att tydligare klara ut vad som menas med begreppet skadezon.

1 INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND	1
1.2 MÅLSÄTTNING	2
1.3 ORGANISATION	3
3 GENOMFÖRANDE	7
3.1 ANVÄNDA SPRÄNGÄMNINGEN	7
3.2 NOLLFÖRSÖK I MALM	7
3.2.1 Nollförsök serie ett	9
3.2.2 Nollförsök serie två	10
3.3 ORTSALVOR I MALM	10
3.3.1 Malm salva 3	12
3.3.2 Malm salva 4	13
3.3.3 Malm salva 5	13
3.3.4 Malm salva 6	13
3.4 ORTSALVOR I GRÅBERG	14
3.4.1 Gråberg salva 1	15
3.4.2 Gråberg salva 2	16
3.4.3 Gråberg salva 3	17
3.4.4 Gråberg salva 4	17
4 RESULTAT FRÅN NOLLFÖRSÖKEN	18
4.1 VÄGUTBREDNINGSHASTIGHETEN I MALMEN	20
4.2 PLATSKONSTANTER I RIKTNING TVÄRS RESPEKTIVE LÄNGS MÄTORT	21
4.3 SAMMANFATTNING AV NOLLFÖRSÖKET	26
5 RESULTAT FRÅN ORTDRIVNINGEN	26
5.1 MALMFÖRSÖK	26
5.1.1 Mätningar	27
5.1.2 Platskonstanter tvärs mätort	27
5.1.3 Funktionskontroll malmförsök	29
5.1.4 Slutlig bestämning av platskonstanter i malm	30
5.1.5 Sprickkartering	34
5.2 GRÅBERGSFÖRSÖK	34
5.2.1 Mätningar	34
5.2.2 Platskonstanter	35
5.2.3 Funktionskontroll gråbergsförsök	39
5.2.4 Sprickkartering	39
6 KRITISK SVÄNGNINGSHASTIGHET	39
7 JÄMFÖRELSER MELLAN PROGNOSE OCH NYA RADIELLA SPRICKOR	40
8 SLUTSATSER	44
9 ERKÄNNANDE	44
10 REFERENSER	45
11 APPENDIX: SPRICKKARTERING	47

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

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 därmed 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, bormönster 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.

Man har utvecklat teknik för öppningar utan grovhål, teknik för långa salvor och användande av exakta intervalltider för att förbättra kontursprängningstekniken (Niklasson & Keisu 1992). För övrigt fann man att nybildade sprickor saknades på avståndet 1,5 m från konturen och att en tydlig skadezon observerades på avståndet 0,3 m från konturen. Rekommendationer har utfärdats (Fjellborg & Olsson 1996) för reducerad laddningsmängd, utveckling av laddtekniken för strängemulsion och en behovsanpassad bergförstärkning därför att en bättre slutkontur bedömdes minska behovet av sprutbetong.

En skalningslag (Holmberg & Persson 1980) har länge använts för att bedöma skadezonen runt spränghål utifrån uppmätta värden för svängningshastighet PPV, (Peak Particle Velocity eller svängningshastighetens toppvärde) från detonerande utsträckta laddningar med känd sprängämnesvikt. En dämpningslag (Hustrulid m fl 1992) har senare tagits fram där man utgår ifrån beräknat tryck i spränghålet för bestämning av bergets dämpning utifrån PPV-värden. Skalningslagen har bl a använts i ett undermarksprojekt (Ouchterlony m fl 1993) och i ett ovanjords projekt (Ouchterlony m fl 1996) för beräkning av skadezonen. I undermarksprojektet (SKB) överensstämde skadezonerna väl med de som var mätta med

geofysiska metoder. En ny metod härledd för bedömning av längden hos radiella sprickor i bergkonturen bakom spränghål (Ouchterlony 1997). I dessa ekvationer används inte svängningshastigheten som påkänningsmått.

Begreppet skadezon är omdiskuterat. Det har bland annat definierats (Andersson 1992) i en SveBeFo- rapport och 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.* Det har också definierats utifrån kritisk svängningshastighet som *"zonen där nya sprickor bildas eller förstoras"* (Holmberg och Persson 1980).

För prognoserna i detta arbete används ordet skador eller skadezon för att indikera att berget utsatts för svängningshastigheter som kan vara kritiska för bergets hållfasthet. När det gäller de karterade skadorna definieras dessa som nya radiella spricklängder från halvpipor i konturen. Sprickorna förutsätts komma från konturhålen.

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 vid SveBeFo. I en sammanfattande rapport (Olsson & Bergqvist 1997) redovisas mekanismerna vid flerhållsprängning samt resultat och rekommendationer.

1.2 Målsättning

Det övergripande syftet med detta projekt var att bidra till utvecklingen av en effektivare ort och tunneldrivningsteknik. Ett av kärnproblemen och huvudmålen kunde formuleras: *1) Att bedöma skador i ortkonturen vid ortdrivning i olika geologier med hjälp av prognoser baserade på accelerationssignaler (m/s^2) i berget vilka integrerats till svängningshastighet, 2) att verifiera skadorna genom att kartera sågsnitt tvärs halvpipor i ortkonturen.*

För att visa på skadeeffekten av olika laddningsmetoder och sprängämnesval planerades att variera, a) försättningen, b) kopplingsgraden d v s förhållandet laddning- /spränghålsdiameter och c) effekten av momentan respektive icke momentan initiering av konturhålen.

Verifieringen av sprängskadeprognoserna skulle ske så att eventuella samband mellan maximala svängningshastigheten och nya sprickor framträdde.

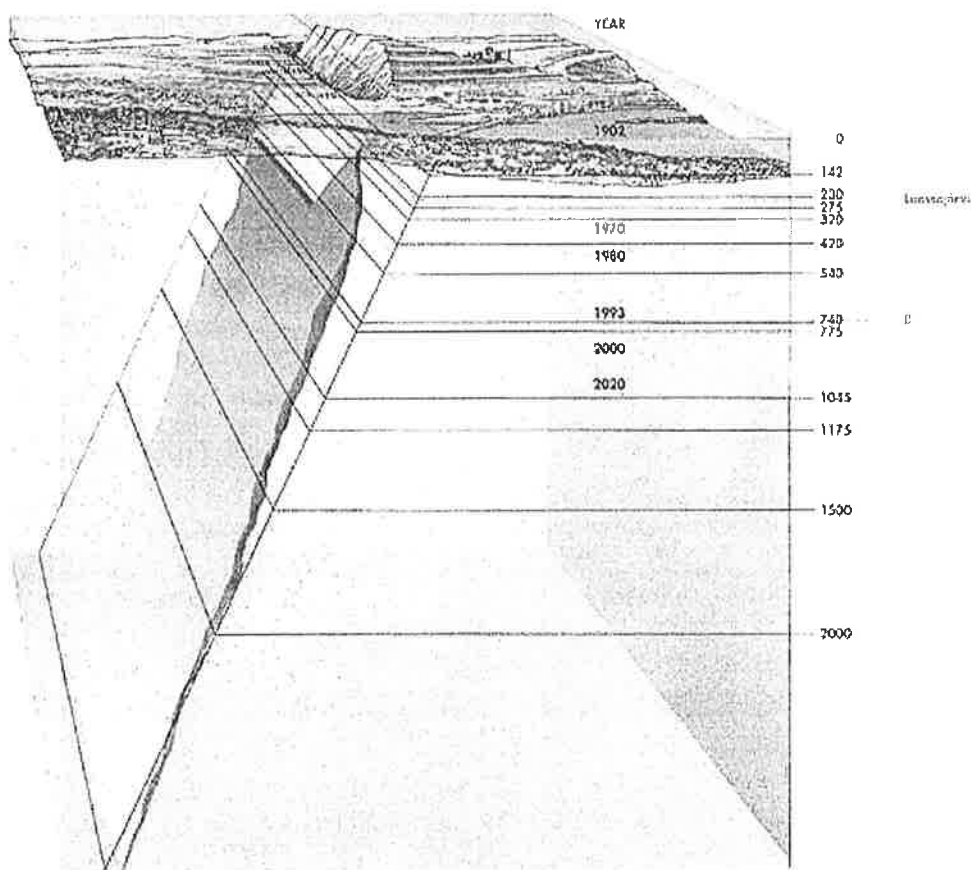
Undersökningen ansågs bidra till en bättre förståelse av de olika mekanismer som styr resultaten vid ort- respektive tunneldrivning och till utnyttjande av de samband som finns mellan svängningshastighet och uppmätta skador i ortkonturen. Arbetet skulle också kunna leda till att den ena prognosekvationen visade sig fungera bättre än den andra.

1.3 Organisation

Under sommaren 1997 ägde ett första planeringsmöte rum. Projektgruppen bestod förutom SveBeFo huvudsakligen av representanter från LKAB, Skanska och Kimit AB. Den enades om att SveBeFo inom forskningsprogrammet 1997 - 99 planerar, driver och genomför projektet "Ort- och tunneldrivning i hårt berg" tillsammans med LKAB med fältmätningarna förlagda till Kirunagruvan.

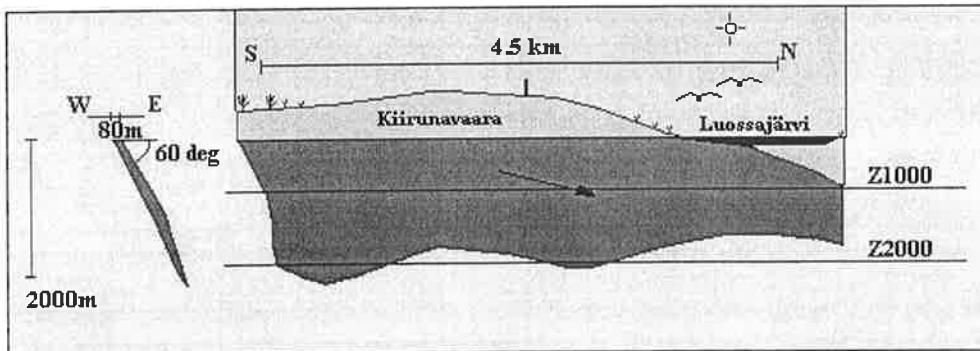
2 PROVPLATSER OCH GEOLOGI

LKAB:s brytningsmetod är storskalig skivrasbrytning med en skivhöjd av 27 meter. Huvuddelen av skivraset bryts tvärgående men även längsgående brytning förekommer. Figur 1 visar malmkroppens utsträckning.



Figur 1: Figuren visar malmkroppens utsträckning. Årtalen anger till vilket år man räknar med att kunna bryta på respektive nivå.

Kiirunavaara är en mycket stor malmkropp, 4500 m lång och medelbredd på 85 m. Den stupar ca 60 grader mot öster och har en nordlig fältstupning. Figur 2 visar en modell av malmkroppen.



Figur 2: Modell av malmkroppen.

Malmen bildades för knappt 1,9 miljarder år sedan och är en intrusiv sill vilket tydligt framgår av breccieringarna runt malmen. Malmen är en finkorning (ca 0,1 mm) magnetit.

I liggväggen består berget av trakyt, kallad syenitporfyr. I västra delen finns ryolit med inlagringar av trakyt. Magnetitens densitet är ca 4800 kg/m^3 .

Hängväggen består av ryolit, kallad kvartsporfyr. Mer exakt är det en ryodacit. Linser av trakyt förekommer sällan. Gångar av diabas och porfyr uppträder.

Man delar upp malmen i två huvudtyper. Dessa är lågfosfor och högfosfor. Högfosformalmen bildar oftast randzoner och ändrar av malmen. Högfosforandelen är ca 25% av tonnaget och avtar för närvarande mot djupet.

Malmen indelas i 7 stycken olika kvalitéter baserade främst på fosfor och alkalihalter, Hansson (1998).

B1	$\geq 66\%$ Fe och $< 0,1\%$ P	D1	$\geq 50\%$ Fe och 0,1-0,8% P
B2	50-66% Fe och $< 0,1\%$ P	D3	$\geq 50\%$ Fe och 0,8-2,2% P
Bbr	40-50% Fe och $< 0,1\%$ P	D5	$\geq 50\%$ Fe och $\geq 2,2\%$ P
Gråberg	$> 40\%$ Fe	Dbr	40-50% Fe och $\geq 0,1\%$ P

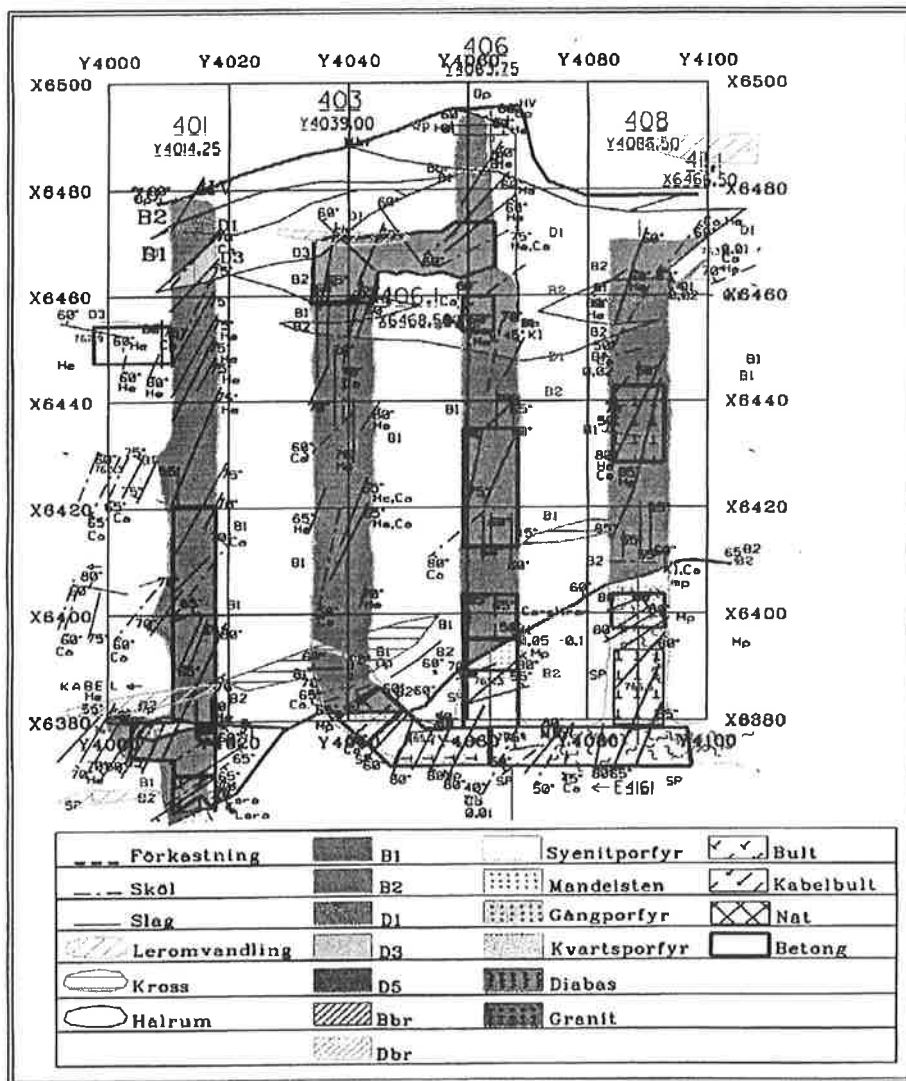
Medelhalten är 64 % Fe, 0,41 % P, 0,06 % Na_2O och 0,18 % K_2O .

Skiva 765 Y40-41

Figur 3 visar malmgeologin i det ena försöksområdet. Skölarna är mer eller mindre öppna sprickor fyllda med mineral som kan vara kalcit (Ca), klorit, pyrit och mull. Slagen är täta sprickor, ibland med tunn hematitbeläggning (He). Kross och leromvandling är prognoser från diamantborrhål. Dessa är ej exakta men visar var i närområdet sådant förekommer.

Malmförsöken genomfördes i två steg i ett speciellt utvalt område. Steg ett var ett antal nollförsök som visas i avsnitt 3.2. Steg två var ortdrivning som visas i avsnitt 3.3. Mätningarna genomfördes i mäthål dels i pelaren mellan ort 406 och 408 dels nära konturen ort 406.

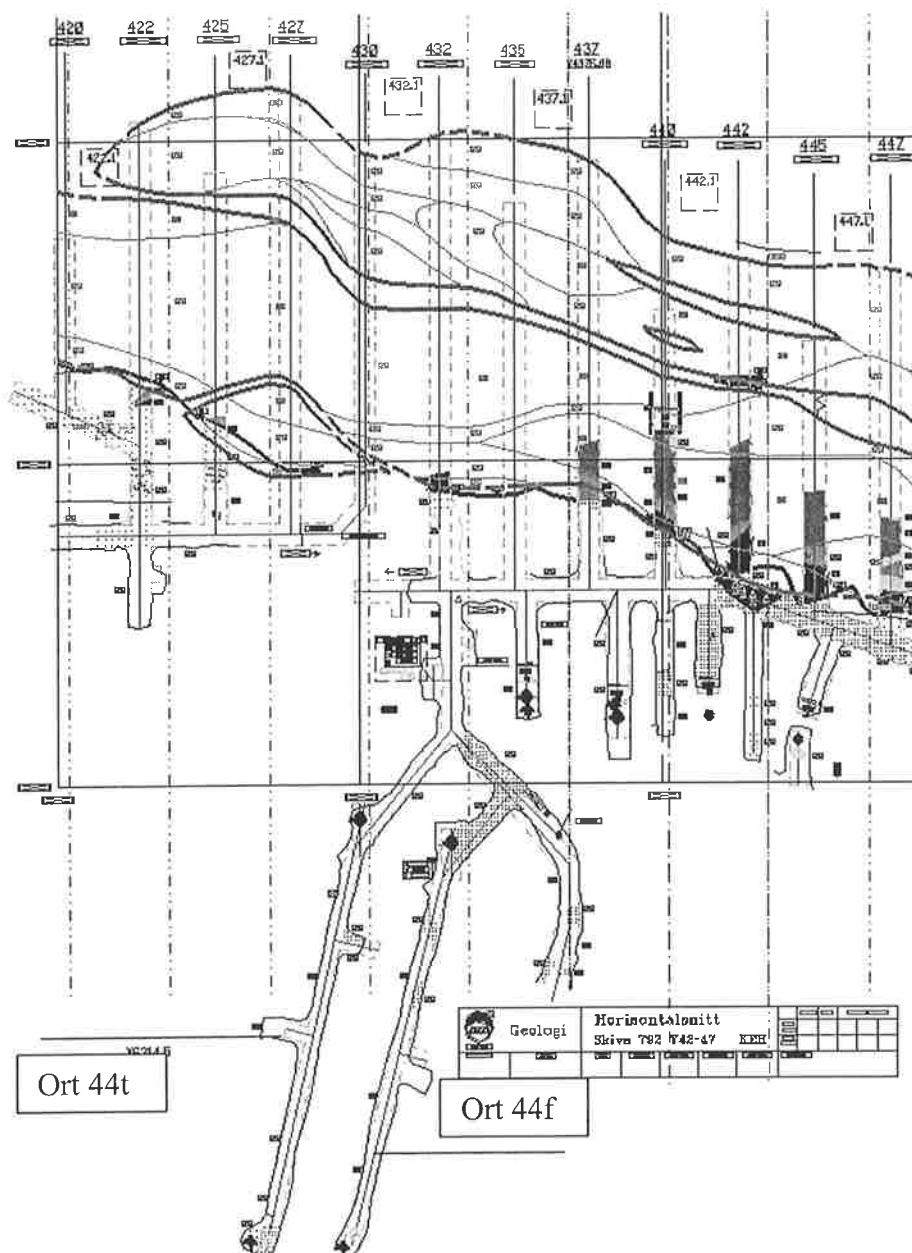
Mätningarna i malmen var approximativt längs respektive tvärs mätort 406 (figur 3). Dessa riktningssangivelser används i de kommande avsnitten.



Figur 3: Geologisk karta över malmområdet ort 406 och 408 på 765 m.

Den andra ortdrivningsdelen genomfördes i gråberg i en annan del av gruvan (figur 4). Gråberget består av syenitporfyr med en densitet på ca 2710 kg/m³.

Mätningarna utfördes här endast tvärs mätort. Mät hålen var borrade från ort 44t mot konturen för salvor i 44f.



Figur 4: Geologisk karta över gråbergsområdet. Salvorna sköts i ort 44f med mät håll borrade från ort 44t.

3 GENOMFÖRANDE

3.1 Använda sprängämnen

Tekniska data för de produkter som normalt används kommer från produktkataloger (tabell 1) Kimit AB och Nitro Nobel AB. I dessa visas bland annat detonationshastigheten för $\phi 50$ mm. I en av salvorna användes även detonerande stubin med en sprängämnesvikt av 80 g/m i några av konturhålen. Dessa hål bottenladdades med 0,5 m Kimulux R pumpemulsion. Siffran 80 anger att den detonerande kärnan väger 80 g/m medan dess totala vikt är ca 93-115 g/m. Detonationshastigheten är större än 6200 m/s, energiinnehållet 5,9 MJ/kg och gasvolymen 800 l/kg.

För initiering av pumpemulsionen användes en 17x135mm KP förstärkarpatron. För initiering av rörladdningarna i konturen användes en 200 mm patron av $\phi 29$ mm Gelatine Donarit 1 d v s dynamit.

För upptändning användes pyrotekniska Dynashoc LP sprängkapslar och Dynatronic elektroniksprängkapslar från DNAG eller en kombination av båda sorterna.

*Tabell 1: Tekniska data ur Kimit's produktkatalog 1998 och ur Nitro Nobels 1994. Referens för Kimulux för vikt och volymstyrka är ANFO med packningsgraden 850 kg/m³. Markering * för saknad tabelluppgift.*

Tekniska data	Kimulux R	Kimulux 82	Kimulux 42	Gurit
Viktstyrka, %	81	111	90	89
Volymstyrka, %	115	150	114	*
Densitet kg/m ³	1200	1200	1100	1000
Detonationshastighet, m/s	5500 ($\phi=50$ mm)	4600	5000 ($\phi=50$ mm)	2000 ($\phi=17$ mm)
Gasvolym l/kg	906	778	874	930
Energi Q, MJ/kg	2,94	4,36	3,35	3,4
Detonationstryck, GPa	9,1	6,1	6,8	Ca 1
Använda diametrar, mm	Fulladdat	29,32,40,50	22	22
Vikter nollförsök kg	2,1-3,9	0,4-1,2	0,2-1,2	Ej använt
Vikter ortdrivning kg	9,8-17,8	3,6-4,3	1,9	1,7

3.2 Nollförsök i 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 av kopplingsgraden ϕ_e/ϕ_h med ϕ_e som sprängämnesdiameter och ϕ_h som håldiameter. Kopplingsgraden varierades 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 Kimulux 42 respektive $\phi_e = 29$ mm, 36 mm, 40 mm och 50 mm Kimulux 82. Fulladdade hål laddades med pumpemulsion KR0000. Mätningarna som utfördes i två riktningar vinkelrätt varandra benämndes serie ett och serie två.

Under fältförsöken mättes och kontrollerades följande:

- x, y, z -koordinater av påslag och hålbotten för spränghålen samt mät hålen,
- accelerationssignaler och integration av dessa,
- sprängämnesvikter,
- längden på varje laddning till ca 500 mm,
- laddningarnas placering i spränghålets längdled,
- laddningarnas placering i spränghålets radiella led med hjälp av plastkragar,
- tiden Δt mellan initiering T_0 och pulsankomst T_n till respektive mätpunkt,
- signalupplösningen med avseende på överlagrande pulser,
- mätstörningar från t ex nätet 50 Hz, brusnivå och lämpliga kabellängder och
- mätsystemets bandbredd och dynamik.

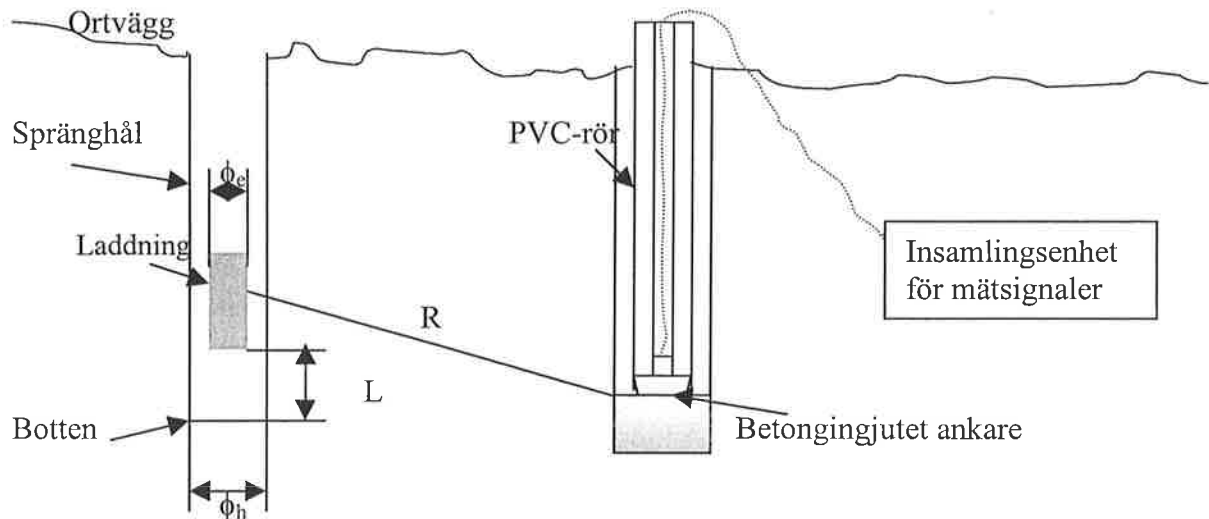
Accelerometrarna orienterades i tre mot varandra vinkelräta riktningar i en och samma punkt $d v s$ mätpunkternas origo. Koordinataxlarna benämns X - horisontellt i mät hålets riktning, Y - horisontellt vinkelrät mät hålets riktning och Z - vertikalt. Notera att dessa axlar inte sammanfaller med gruvans x- y- och z -riktningar. Tekniska specifikationer ges av:

- ± 5000 g med amplitudrespons (± 1 dB) 3 Hz-20 kHz
- ± 10000 g med amplitudrespons (± 3 dB) 100 Hz-25 kHz
- ± 5000 g med amplitudrespons (± 3 dB) 50 Hz-25 kHz

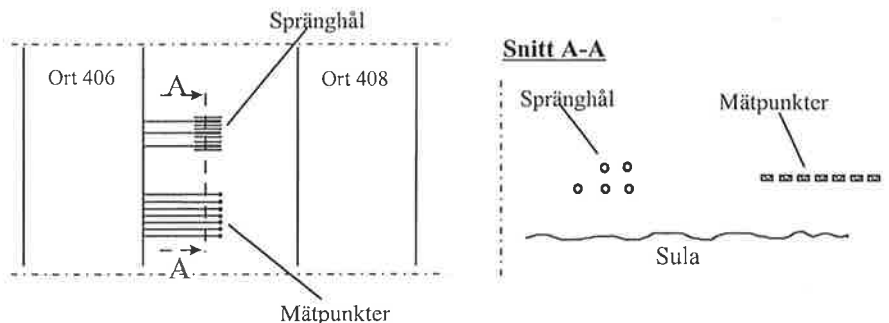
Vid sprängning överfördes de mekaniska vibrationssignalerna från laddningarna genom berget till de cementingjutna aluminiumankare som accelerometrarna var fastskruvade vid i botten av mät hålen. Därifrån överfördes de elektriska signalerna via koaxialkablar av typ RG58, till en så kallad signal Conditioner (Endedevco, modell 2793:1 Hz - 30 kHz) och slutligen via RG58-kabel till en bandspelare för digitalisering och lagring. För detta användes en ny typ av digitala band så kallad advanced Intelligent Tape (AIT) med en bandbredd av DC - 20 kHz. Samplingshastigheten för bandspelaren (Sony, SIR 1000) var 2,4 gånger den kritiska bandbredden med alla 16 kanalerna i samtidig mätning.

3.2.1 Nollförsök serie ett

Principen för hur kopplingsgraden varierades framgår av figur 5. Figur 6 visar enskottsförsöken längs med drivningsorten.



Figur 5: Princip för enskottsförsök med frikopplade laddningar. Genom att ändra laddnings- och spränghålsdiametern så kunde kopplingsgraden varieras. Spränghålen var öppna i ena änden vid alla försöken. I mätpunkten närmast spränghålen gjordes 3D-mätningar, annars 2D-mätningar. Utav de tre komponenterna var två horisontella och en vertikal.

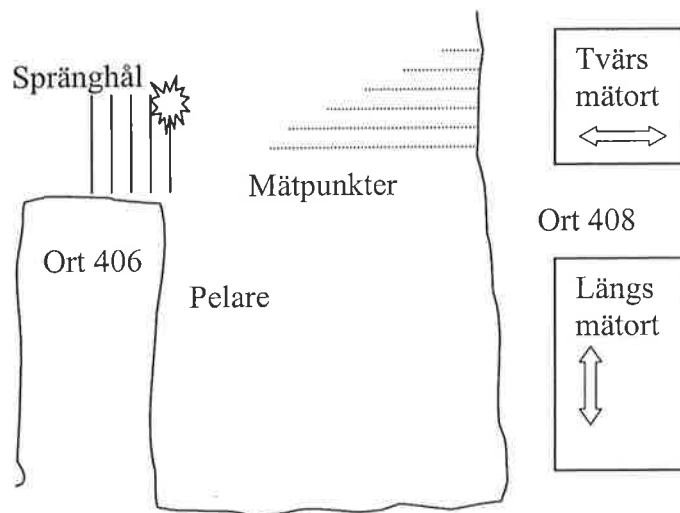


Figur 6: Princip för enskottsförsök med frikopplade laddningar längs med ort 406. Det var fem spränghål med diametern 100mm, 76 mm och 64 mm. Mäthålen var sju stycken. Alla hål borrades approximativt till pelarens mitt, ca 8 m in från ytan. Varje spränghål användes flera gånger och laddningarna flyttades 500 mm i spränghålet före omskjutning för att tidigare skador inte skulle påverka mätresultaten. Horisontella mätkomponenterna var orienterade längs respektive tvärs mäthålen. Den vertikala var vinkelrätt mot de två andra.

3.2.2 Nollförsök serie två

Mätningarna tvärs med drivningsorten visas i figur 7. Sammanlagt 12 stycken enskottsladdningar avfyrades i fem stycken laddhål i ort 406. Mät hålen borrades vinkelrät väggen från ort 408 till olika djup.

Antalet användbara skott var 7 stycken. De övriga som var laddade med primer eller pentyl gav för svaga vågpulser för de aktuella mätavstånden. På grund av dålig noggrannhet i borrhålen gick dessutom gas från laddningshålet ut i ett mät hål vid den fjärde mätningen (s4). Detta resulterade tyvärr i att mät punkten förstördes och att vi totalt fick färre antal mät punkter än förväntat.



Figur 7: Princip för nollförsök tvärs mätort. Spränghålen var 5 m långa och laddades i botten. Mät punkterna låg ungefär i samma plan som spränghålen. I mät punkten närmast spränghålen gjordes 3D-mätningar, annars 2D-mätningar. Notera att mätriktningen varierade mer än för serie 1 d v s accelerometrarna låg inte helt i linje med laddningarna i spränghålen.

3.3 Ortsalvor i malm

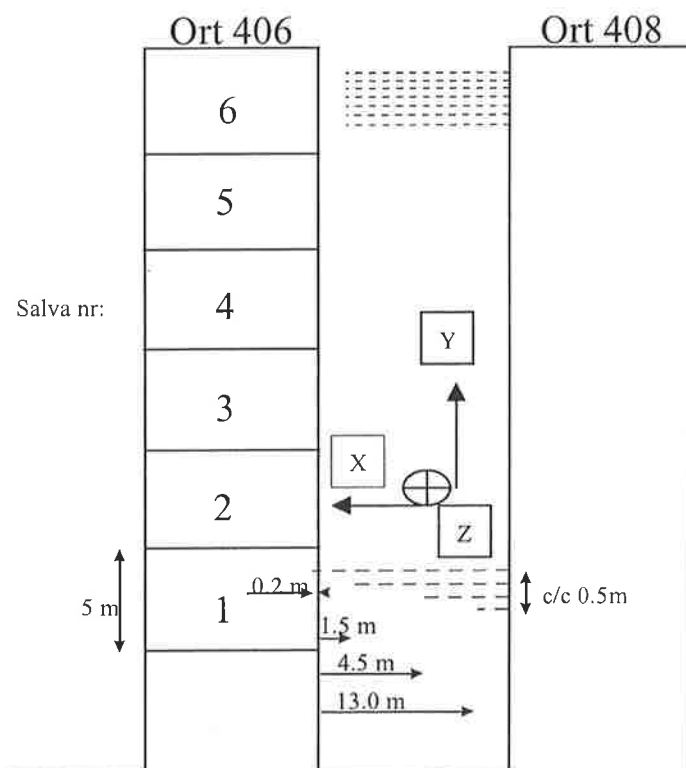
När det gäller ortsalvorna (figur 8) har vi genomfört följande. Först analys av mätningarna och prognoser av bergskadorna, därefter kartering av sågsnitt tvärs halvpipor i ortkonturen. Dessutom genomfördes en funktionskontroll av salvorna. Arbetet kan sammanfattas på följande vis.

- Mätning av 3D-accelerationssignaler i berget i flera punkter på olika avstånd från laddningar
- Integration av accelerationssignalerna och avläsning av PPV
- Analys med hjälp av två prognosekvationer för PPV samt bedömning av kritiska värde PPV_c för bergskada

- Sågsnitt genom borrhölor i ortkonturerna för sprickkartering (appendix, malmavsnittet)
- Undersökning av hur salvornas försättning, tändsättning (d v s momentan eller icke momentan initiering i konturen) samt hur strängladdning eller rörladdning påverkar konturskadorna
- Jämförelser av skadeprognoiser med de faktiskt karterade sprickorna

Mätningar av signaler från sex ortsalvor utfördes på 765 m avvägning i ort 406-408 i B-malmen.

Strosshålen var för samtliga salvor fulladdade och tidssatta med normal tändspridning. För salvorna 1-5 var konturhålen frikopplade med ϕ_{e22} mm rörladdningar. Salva 6 var laddad med 4 olika frikopplade sprängämnestyper i konturen.



Figur 8: Skiss som visar hur mätpunkterna placerades i förhållande till den teoretiska ortväggen för salva ett. För salva 2-5 borrades mäthål på samma sätt. För salva 6 borrades 22 stycken mäthål för mätning endast i X-riktningen.

Ortsalvorna sprängdes i en ort i malmkroppen som ingick i skivrasbrytningen. Frontytan för de sex salvorna var ca 42 m² och borrhålen 5 m långa med borrhålsdiametern ϕ_{48} mm. I salvorna 1-5 fanns ett 250 mm borrarat grovhål. I salva 6 sprängdes kilen för sig eftersom grovhål saknades. Man hade borrarat 67 - 69 hål per salva.

Drivningsorten var ort 406 parallellt med ort 408 från vilken mäthål borrades. Mäthålerna var placerade approximativt vinkelrätt mot sprängborrhålen mitt på dessa.

Vibrationsmätningarna utfördes med tre komponent i fyra mätpunkter för salvorna 1-5. Salva 6 mättes med en komponent mot konturen med 22 mätpunkter på ungefär samma avstånd till konturen.

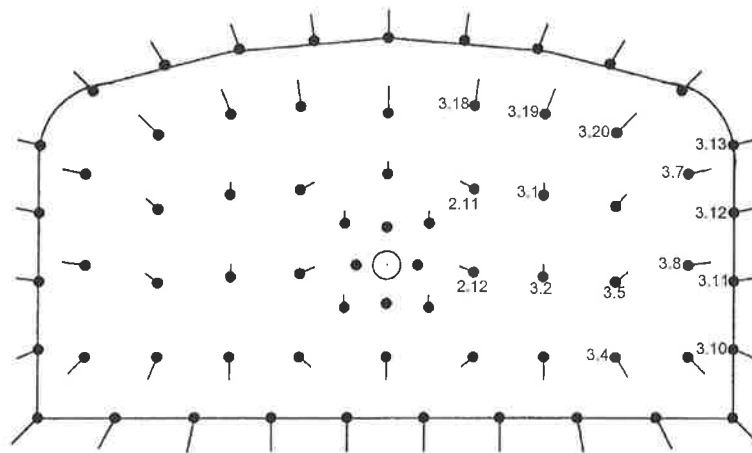
För att med hjälp av elektroniska tändare åstadkomma en salva som efterliknar en vanlig produktionssalva med pyrotekniska tändsystem, slumpades tändtiderna fram. Dessa avvek från de nominella med en standardavvikelse av ca 3%. För de elektroniska tändarna så är tändspridningen maximalt ca 0,1ms (Olsson & Bergqvist 1997). Kilen var borrarad med $\phi_{1,64}$ mm kronor.

I laddning- och tändplanerna (figur 9 och 10) är borrhålens placering vid påslaget markerade med punkter. De streck som utgår ifrån punkterna markerar stickningen, som kan sägas vara hålriktningens avvikelse från ortens längdriktning.

Stickning utförs främst för att man skall komma åt att borra de hål som utgör kontur, tak och sula i orten. I de fyra kommande avsnitten beskrivs de salvor som utvärderats.

3.3.1 Malm salva 3

Upptändning skedde med hjälp av elektroniska tändare som satts med tider som motsvarar tiderna för pyrotekniska sprängkapslar med samma intervallnummer. Turordningen för konturhålen var vägg, vägg, tak. Försättningen mellan kontur och första hjälpparrad var 0,6 m. Det fanns vatten i hålen vid höger kontur och hjälpparrad samt i de tre respektive två undre hålen för yttre stross och raden innanför yttre strossraden. Strosshålen var fulladdade med emulsion Kimulux R och konturen med ϕ_{e22} mm rörladdningar med Kimulux 42. Samtliga accelerometrar fungerade och för den här salvan kunde alla fyra mät hålen utvärderas.



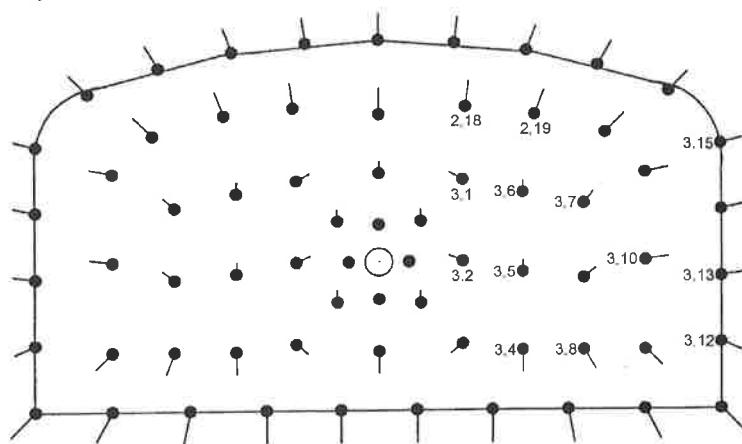
Figur 9: Borrhålens placering och nummer för dem som identifierats och tolkats i Salva 3.

3.3.2 Malm salva 4

Konturen och de tre raderna innanför konturen tändes med elektroniska kapslar medan övriga tändes med pyrotekniska kapslar. Högra konturen sköts momentant medan tiderna för de övriga elektroniska tändkapslarna slumpades. Försättningen var 1,0 m. Samtliga strosshål var fulladdade med emulsion Kimulux R och konturhålen var laddade med rörladdningar $\phi_e 22$ mm Kimulux 42. Vid salva fyra saknades signal från en av accelerometrarna i mäthål fyra varför treaxiell utvärdering endast kunde ske för tre av hålen.

3.3.3 Malm salva 5

Salva 5 var identisk med salva 3 sånär som på försättningen mellan kontur och första hjälpparrad som var 1,0 m.



Figur 10: Borrhålens placering och nummer för dem som identifierats och tolkats i Salva 5.

3.3.4 Malm salva 6

Höger kontur laddades med olika laddningstyper. De fem konturhålen innehöll, räknat nedifrån och upp: Emulsion fulladdat, Kimulux 42 $\phi_e 22$ mm rörladdning, strängemulsion, strängemulsion samt 80 g pentylstubin. Andra hålet nedifrån räknat hade avvikande längd och de två översta hålen var trasiga. Signaler från 22 stycken mätpunkter registrerades och utvärderades. Accelerometrarna var orienterade endast i mäthålens riktning.

Vidare analys av denna salva påbörjades men fullföljdes ej. Anledningarna till detta var flera. Borrningsprecisionen för mäthålerna var låg, dessutom låg samtliga mätpunkter på samma avstånd från laddningarna vilket ger ett litet avståndsintervall för mätningarnas giltighet eftersom formlerna är avståndsberoende.

3.4 Ortsalvor i gråberg

Från malmförsöken kunde vi se att det var stor skillnad i antalet synliga hålpipor i vänster respektive höger vägg. Det var svårt att utvärdera sprickorna i ett mycket uppsprucket berg när referensdata saknades och svårt att utvärdera accelerationssignalerna från momentan initiering.

Detta medförde att vi planerade undersöka följande:

- inverkan av sprängämne med låg VOD,
- effekten av lokal sprickbildning,
- inverkan av momentan respektive icke momentan initiering och
- inverkan av endast hjälparrad och konturrad (strossning medför mindre inspänd salva).

Utformningen av salvorna ändrades under planeringen och kom slutliga att omfatta följande:

Tabell 2: Planerade gråbergssalvor.

Salva	Vänster vägg					Höger vägg				
	Håldim	Laddn	Init	PPV	Såga	Håldim	Laddn	Init	PPV	Såga
1	48	Kim*	Ej mom	Nej	Ja	48	Kim*	Ej mom	Ja	Ja
2	64	Kim*	Mom	Nej	Ja	64	Gu-22	Mom	Ja	Ja
3	64	Kim*	Ej mom	Nej	Ja	64	Gu-22	Ej mom	Ja	Ja
4	64	Gu-22	Ej mom	Nej	Ja	64	Gu-22	Ej mom	Ja	Ja

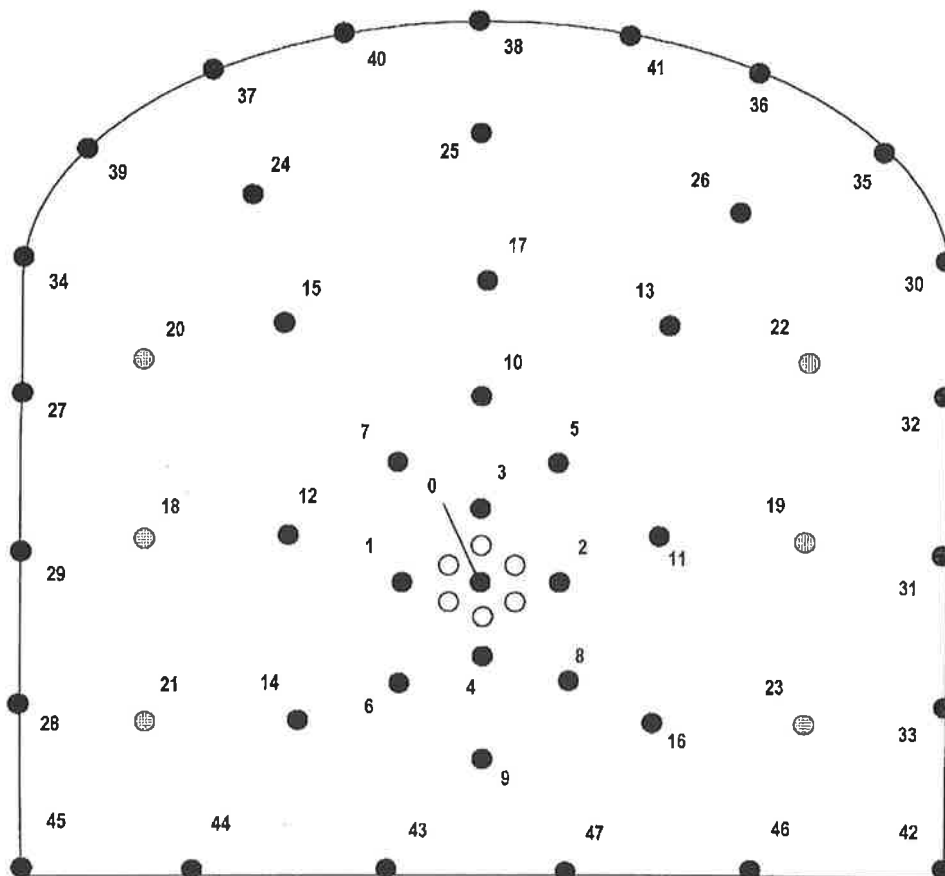
Salvorna som beskrivs nedan (figur 11-14) har ett tvärsnitt på ca 21 m², 5,0 m håldjup, 4,5 m laddad hållängd. Salvorna hade 6 stycken oladdade hål i öppningen. Siffrorna anger kapslarnas nummer. Varje nummer har en initieringstid som bestämts av kapselvalet för LP-kapslar eller vid förprogrammering vid användning av elektronikkapslar. Figureerna visar också hur salvorna tidsattes. Spränghålens påhugg och hålbotten var med vissa undantag inmätta av gruvmätningen i x, y, z – koordinater i gruvans mätsystem.

Mätningarna utfördes som i malmförsöken med två undantag. Vi använde 1), 3 stycken mätpunkter i stället för 4 stycken och 2), det längsta mätstålet var placerat längst bak relativt ortdrivningsriktningen i stället för längst fram.

Sprickkarteringen i sågsnitt utfördes på samma sätt som i malmen. Resultaten redovisas i appendix (gråbergsavsnittet).

3.4.1 Gråberg salva 1

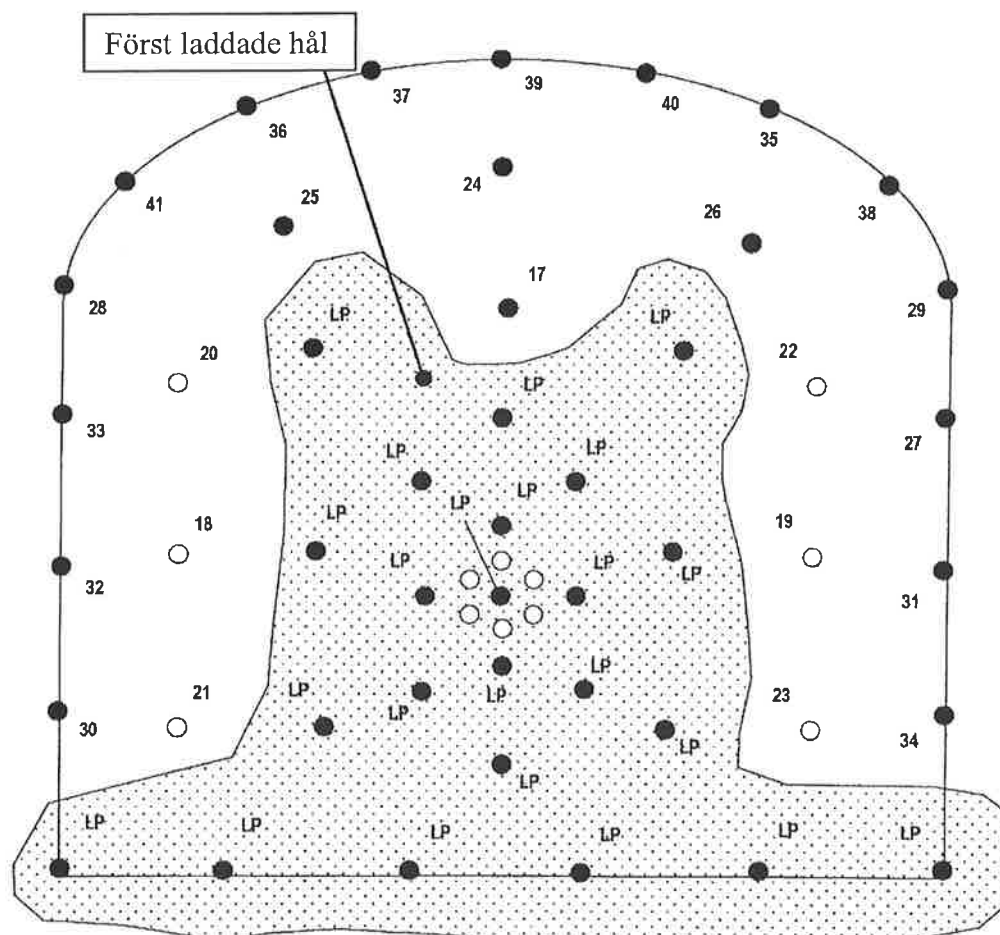
Salvan (figur 11) var borrard med $\phi_h 48$ mm hål. Den var laddad med 2,22 kg/m pumpemulsion Kimulux R i strossen med sprängämne $\phi_e 48$ mm, 0,96 kg/m $\phi_e 32$ mm rörladdningar Kimulux 82 i hjälparen och 0,42 kg/m $\phi_e 22$ mm rörladdningar Kimulux 42 i konturen. Alla laddningarna tändsattes med elektronik.



Figur 11: Borrhålens placering och nummer för gråbergssalva ett.

3.4.2 Gråberg salva 2

Denna salva (figur 12) var borrard med $\phi_h 48$ mm i stross och hjälpare samt $\phi_h 64$ mm i konturen. Den laddades och tändsattes först med standardkapslar (LP). Senare rensolades konturen och hjälpare för att laddas om med elektronikkapslar och rörladdningar. Salvan var därför delvis tidsatt med elektroniksprängkapslar.

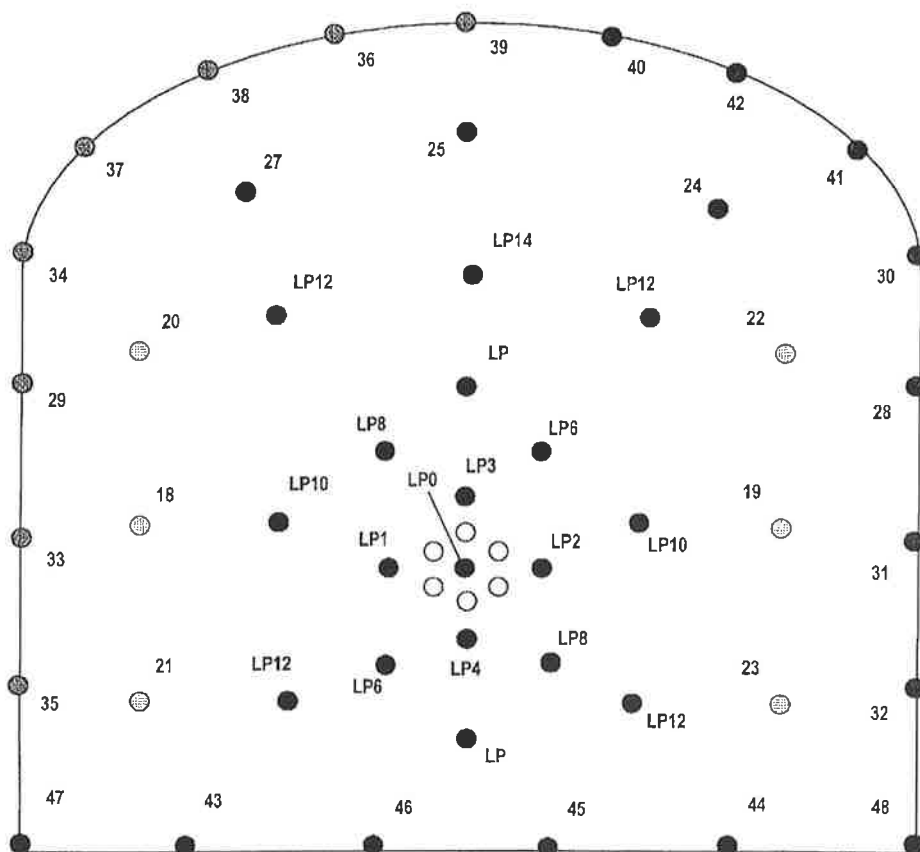


Figur 12: Borrhålens placering och nummer för gråbergssalva två. Vänster sida hade Kimulux 42 och höger sida Gurit.

Salvan var laddad med 2,22 kg/m pumpemulsion Kimulux R i strossen, 0,79 kg/m $\phi_e 29$ rörladdningar Kimulux 82 i hjälparen och 0,40 kg/m $\phi_e 22$ rörladdningar av Gurit i höger kontur

3.4.3 Gråberg salva 3

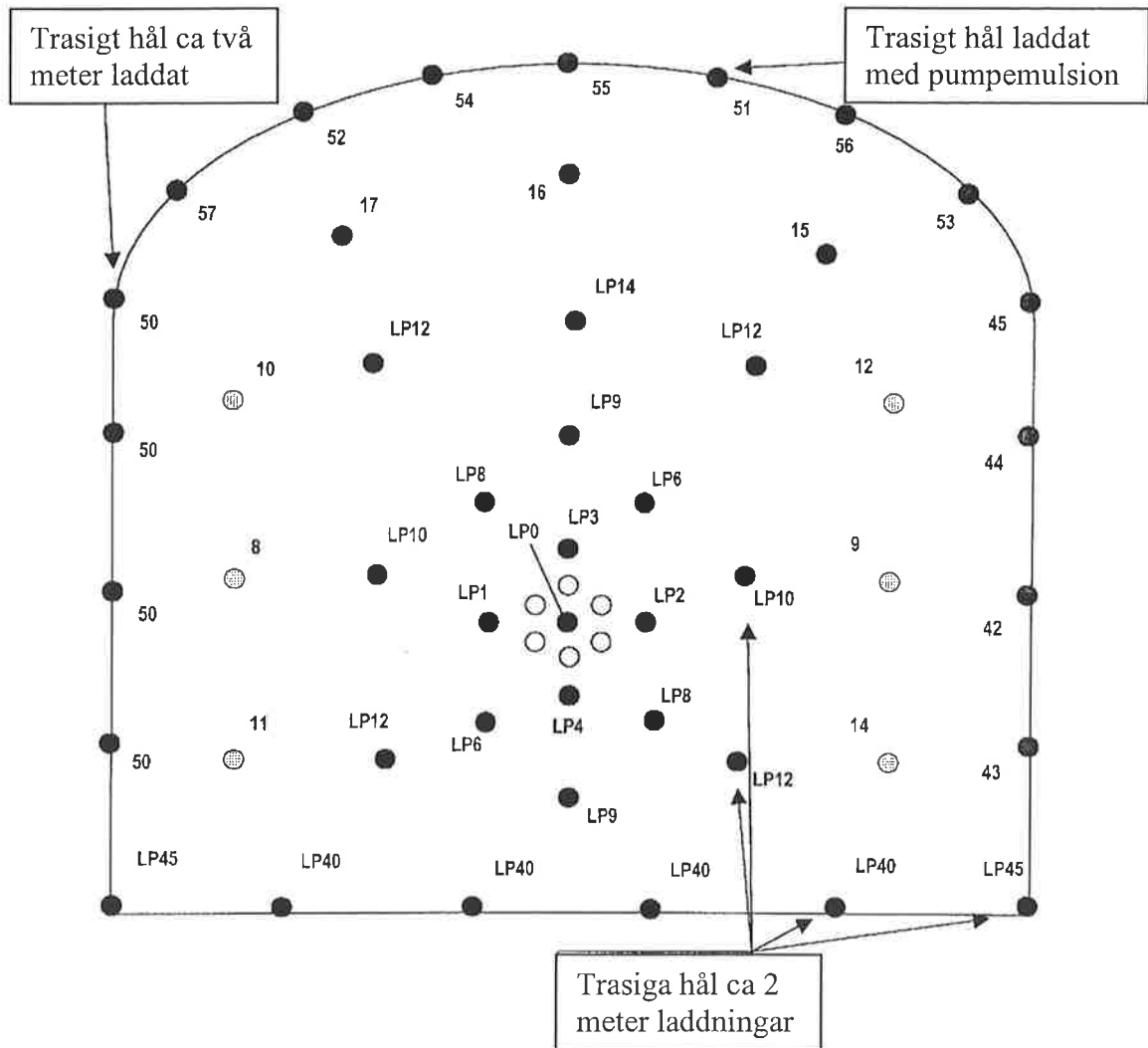
Denna salva (figur 13) var borrarad med $\phi_h 48$ mm i stross och hjälpare samt $\phi_h 64$ mm i konturen och tändsatt delvis med elektronik. Salvan var laddad med 2,22 kg/m pumpemulsion Kimulux R i strossen, 0,79 kg/m $\phi_e 29$ mm rörladdningar Kimulux 82 i hjälpare och 0,40 kg/m $\phi_e 22$ mm rörladdningar av Gurit i konturen.



Figur 13: Borrhålens placering och nummer för gråbergsalva tre.

3.4.4 Gråberg salva 4

Denna sista salva i serien (figur 14) var borrarad med $\phi_h 48$ mm i stross, hjälpare samt $\phi_h 64$ mm i konturen och delvis tändsatt med elektronik. Salvan var också här laddad med 2,22 kg/m pumpemulsion Kimulux R i strossen, 0,79 kg/m $\phi_e 29$ mm rörladdningar Kimulux 82 i hjälpare och 0,40 kg/m $\phi_e 22$ mm rörladdningar av Gurit i konturen.



Figur 14: Borrhålens placering och nummer för gråbergsalva fyra.

4 RESULTAT FRÅN NOLLFÖRSÖKEN

I inledningen framgår att två ekvationer kommer användas för skadeprognoserna i ortkonturen. Dessa beskrivs nedan.

Den tidigare och ofta refererade skalningslagen (Holmberg och Persson 1980) har publicerats för ett par decennium sedan. Till denna har vi lagt de två sista termerna i ekvation (1) nedan. Senare har en alternativ dämpningslag (2) (Hustrulid m.fl. 1992) föreslagits för att beräkna svängningshastigheten.

Den huvudsakliga skillnaden är att den tidigare använder laddningsvikten Q som viktigaste variabel. Den senare använder i stället språnghålstrycket P_h . Laddningsvikten är normalt känd men språnghålstrycket däremot måste uppskattas ur någon formel t ex ekvation (2.1) nedan eller mätas (Nie 1999). Mätningarna tyder på behovet av en annan formulering av borrhålstrycket. Ekvation (1) kan skrivas:

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

Här är parametrarna interceptet A , sprängämnesexponenten α och avståndsexponenten β . Förutom de tre första har en adiabatisk expansionsexponent 2γ med kopplingsgraden ϕ_e/ϕ_h , (Atchison 1964) lagts till i den ursprungliga ekvationen. De tre första konstanterna karakteriserar mätplatsens geologi. Den fjärde beskriver den reducering av svängningshastigheten som uppnås genom att låta laddningarna vara mindre än spränghålet d v s frikopplade. Konstanten δ sist i uttrycket beskriver beroendet av en frivolytm med avståndet L mellan laddningen och hålbotten. Uttrycket lyder $\eta(L) = 1/(1+L/H)$. För korrektionen $g(H/R)$ (Ouchterlony m fl 1993) gäller att:

$$g(H/R) = (\text{atan}(0,5H/R))/(0,5H/R) \quad (1.1)$$

För att kunna bestämma parametrarna i ekvation (1) med linjärregression måste den logaritmeras i båda leden d v s vi använder $\log(PPV) - \log(R)$. Hur bra ekvationen med insatta parametrar återger mätdata anges t ex av "coefficient of determination" r^2 som antar värden $1 \geq r^2 \geq 0$. För den bästa passningen är r^2 störst, $r^2 = 1$ betyder fullständig överensstämmelse.

Den andra ekvationen, dämpningslagen (2) (Hustrulid 1992), är sammansatt av en första del, (Favreau, 1969) och en andra del bestående av en exponentiell dämpningsterm. Ekvationen lyder:

$$PPV = 0,61 (P_h / \rho c) (\phi_h / R) e^{-IR} \quad (2)$$

Här är dämpningskonstanten I och akustiska impedansen för berg $\rho \cdot c$, platskonstanter. Dämpningen I kan allmänt sägas bestå av absorption d v s omvandling av vågenergi till värme och av spridning (eng: scattering) som uppkommer i kontakterna mellan material eller korn med olika elastiska egenskaper (Wiberg 1993). De aktuella variablerna är spränghåltryck P_h och avstånd R mellan laddning och mätpunkterna. Vidare antas att PPV kommer från den punkt (enhetssfär) i spränghålet som ligger närmast mätpunkten. Om en enhetssfär med diametern b ersätts med en cylinder med diametern ϕ_h och höjden $2b$ så kan enhetssfären skrivas som $0,61\phi_h$, som i ekvation (2). Borrhålstrycket kan approximativt skrivas:

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

Explosionstrycket P_e kan erhållas av sprängämnestillverkare. De två lätt mätbara kvantiteterna är, explosivämnets täthet ρ_e och detonationshastigheten VOD (Deng m. fl. 1999). Den använda ekvationen lyder:

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

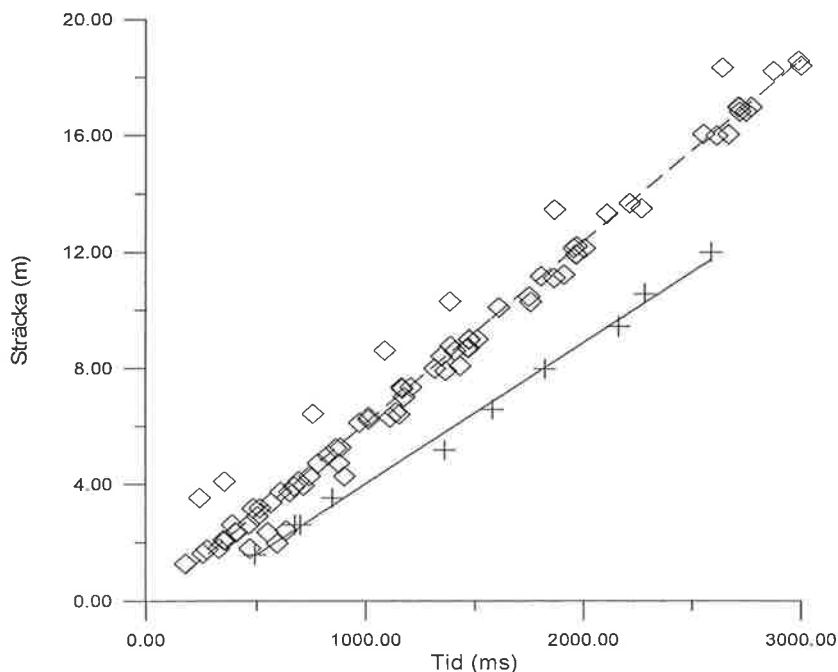
Som i ekvation (1) är kopplingsgraden $f = (\phi_e/\phi_h)$ och γ är en adiabatiska exponenten som relateras till expansion av spränggaserna till spränghålets volym.

För att bestämma parametrarna i dämpningslagen med linjärregression kan vi inte använda $\log(\text{PPV}) - \log(R)$ som tidigare. Istället används i princip $\ln(\text{PPV} \cdot R / \phi_h) = \ln(a) + I(R - 0,61 \phi_h)$ där konstanten $a = (0,61/8) (\rho_e VOD^2)/(\rho c)$. Det bästa r^2 - värde för denna regression är inte direkt jämförbart med det för regression av ekvation (1) utan måste räknas om (t ex enligt Chatfield 1978) för att bli det.

När det gäller minsta kvadratpassning av linje beräknade ur ekvationerna ovan, så har denna utförts till toppvärdet av de integrerade accelerationssignalerna (PPV-värden).

4.1 Vågutbredningshastigheten i malmen

Vågutbredningshastigheten c i malmen bestämdes ur mätningar av sträcka - tid för respektive enskotts försök (figur 15). Denna ingår som en konstant i dämpningslagen. Sträckorna beräknades utifrån LKAB:s inmätta koordinater. Tiderna beräknades ur skillnaden mellan de första starka vågpulsernas ankomsttider T_n till respektive mätpunkt och tiden T_0 för detonationen d v s ur $T_n - T_0$. Mätningarna kommer från 13 stycken av de 16 stycken nollförsöken i riktningen längs mätorten och från 2 stycken försök tvärs mätorten.



Figur 15: Figuren visar lin - lin diagram för linjepassning för beräkning av våghastigheten c i två riktningar approximativt vinkelrätt varandra i pelaren mellan ort 406 och 408. Kvadraterna representerar mätningar längs mätorten med ekvation $Y = 6273 X - 0,166$, 84 stycken datapunkter och $r^2 = 0,98$. Tvärs mätorten blev hastigheten $Y = 4881 X - 0,871$, med 10 stycken datapunkter och $r^2 = 0,99$.

Hastigheterna som bestämdes ur räta linjen i de två riktningarna blev:

- 6273 m/s för mätningar längs ort 406 (fyrkanter) och
- 4881 m/s tvärs ort 406 (kryss).

Kommentar: Ett tidkonstantfel uppkom vid mätningen av T_0 vilket har parallellförflyttat vissa mätpunkter. Passningslinjen skär därför inte origo (figur 15).

4.2 Platskonstanter i riktning tvärs respektive längs mätort

Allmänt vet man att utbredningshastigheten och svängningshastigheten påverkas av mätplatsens geologi, spricksystem, bergvatten det vill säga att platskonstanterna kan variera signifikant. Men också frikopplingen påverkar bestämningen av platskonstanterna.

För att anpassa de två ekvationernas parametrar till dessa förhållanden så görs här en genomgång av ett antal viktiga faktorer.

Ett allmänt värde på malmens densitet ρ var 4800 kg/m^3 (Hansson 1999). Våghastigheterna c bestämdes ur nollförsöken och explosionstrycket ur ekvation (2.2).

För beräkningar av PPV i riktning tvärs mätort har ekvation (1) kunnat reduceras till (1.2):

$$A((g(H/R)Q)^\alpha / R^\beta) \quad (1.2)$$

En flervariabelregression av ekvation (1) har visat att $\alpha/\beta = 0,53$, att effekten av funktionen $g(H/R)$ har liten betydelse, att det inte är någon signifikant inverkan från vare sig frikoppling eller L.

Tabell 3 visar resultaten tvärs mätort från beräkningar av intercept A och lutningarna α and β , grundade på 20 stycken PPV-värden med laddningsvikten Q varierande 0,35-4,65 kg respektive R varierande 1,57 - 11,99 m. Resultaten kommer att slås samman med ortförsöken och visas i kommande avsnitt.

Tabell 3: Parametrar för ekvation 1 i riktning tvärs mätort. Fria parametrar visar resultaten när två lutningar, α och β används och $\alpha = \beta/2$ visar en förenklad kvadratrotsskalning.

Holmberg och Persson, nollförsök tvärs mätort

Parametrar	A (m/s)	α	β	r^2
Alla fria	$0,83 \pm 0,35$	$0,91 \pm 0,14$	$1,72 \pm 0,23$	0,75
Kvadratrotsskalning	$0,89 \pm 0,29$	$\alpha = \beta/2$	$1,75 \pm 0,20$	0,75

Längs mätorten användes 105 stycken PPV- värden med Q varierande 0,38-3,88 kg, med (ϕ_e/ϕ_h) varierande 0,22 - 1,00 m och med R varierade 1,45 - 18,37 m. En flervariabelregression visade att $\alpha/\beta = 0,69$. För beräkningar av de fem respektive tre parametrarna har ekvation (1.3) använts. Ekvation (1) utan laddningslängdsberoendet kan skrivas:

$$PPV = A \cdot (Q)^\alpha / R^\beta \cdot (\phi_e/\phi_h)^{2\gamma} \cdot \eta(L)^\delta \quad (1.3)$$

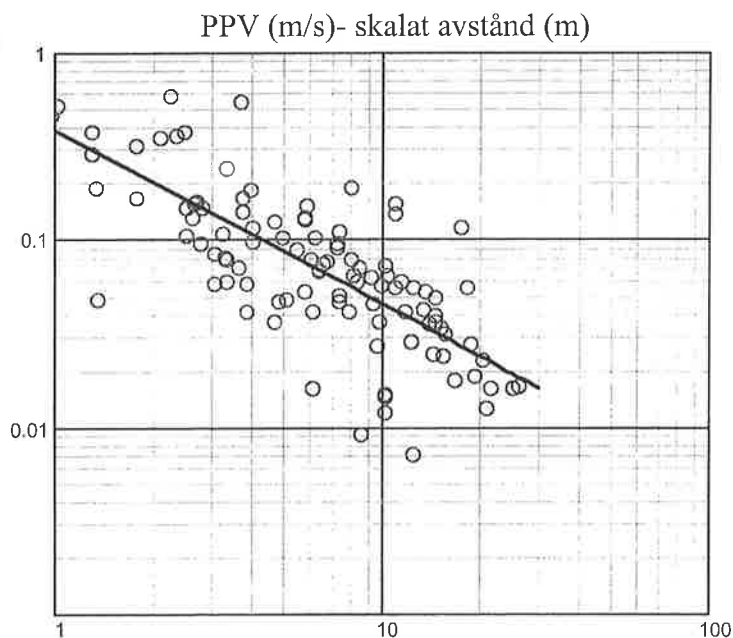
Här är A, α , β , 2γ och δ alla fria parametrar. I tabell 4 visas resultatet längs mätort från nollförsöken med förenklingen $\alpha = \beta/2$.

Tabell 4: Parametrar i ekvation 1.3 som beräknats från ett mätunderlag av 105 PPV-värden i riktning längs mätort. Det som benämns fria parametrar visar resultaten med alla parametrar fria, $\alpha = \beta/2$ visar förenklad kvadratrotsskalning. Inverkan av frikoppling 2γ och laddningens placering δ i spränghålet är medtaget. Notera att r^2 var 0,61 för båda fallen.

Holmberg och Persson, nollförsök längs mätort

Parametrar	$A(m/s)$	α	β	2γ	δ
Alla fria	$0,33 \pm 0,18$	$0,64 \pm 0,35$	$0,93 \pm 0,18$	$0,41 \pm 0,56$	$-0,10 \pm 0,23$
Kvadratrotsskalning	$0,38 \pm 0,15$	$\alpha=\beta/2$	$0,93 \pm 0,18$	$0,49 \pm 0,45$	0

Som tabell 4 visar så skiljer vare sig volymexponenten δ eller 2γ signifikant från noll för fria parametrar. Notera att variabeln R allmänt används för avstånd och att k används som variabel i figurer. Figuren nedan visar linje från skalningslagen och mätningar längs mätort med parametrar från tabell 4.



Figur 16: Log-log- diagram för PPV- värden plottade mot skalade avståndet $R/Q^{0.5}$ tvärs mätort för skalningslagen med frikopplingseffekt medtagen.

Nästa steg blir att tillämpa dämpningslagen (2) i mätningen tvärs mätort. Parametrarna är konstanten $A = \ln[(0,61/8) (\rho_e VOD^2)/(\rho c)]$, bergdämpningsexponenten I och en adiabatisk exponent 2γ .

När det gäller explosionstrycket P_e i ekvation (2.2) ingår detta i konstanten A . För att undersöka hur bra dämpningslagen beskriver mätvärdena har A även släppts fri och parametrarna ånyo beräknats. De annorlunda värdena kan tolkas så att ekvation (2.1) inte ger en riktig uppskattning av borrhålstrycket eller att konstanten 0,61/8 är olämpligt vald. Tabell 5 nedan visar resultat från nollförsök tvärs mätort baserat på 20 stycken värden.

Tabell 5: Parametrar i ekvationerna (2) och (2.1) beräknade från ett mätunderlag av 20 stycken PPV-värden i riktning tvärs mätort. Malmens densitet ρ är 4800 kg/m³. OBS att konfidensintervallet ⁽¹⁾ saknas i A därför att värdet är en given konstant.

Hustrulid, nollförsök tvärs mätort

Parametrar	A	I	2 γ	r ²
P _e enligt ekv. (2.2)	4,77 ⁽¹⁾	0,33 ± 0,03	3,42 ± 0,50	0,70
Fritt A	3,33 ± 0,34	0,15 ± 0,05	2,28 ± 0,47	0,65

Ett A-värde i den ursprungliga dämpningslagen kan alltså beräknas ur $\ln[(0,61/8) (\rho_e \text{ VOD}^2)/(\rho c)]$. En kvot η (kan betraktas som ett godhetstal) mellan detta A-värde och det beräknade ur fritt intercept kan bli ganska liten och tydligt skild från ett. En jämförelse visar att $\eta = e^2/e^{4,2} \approx 0,11$ (tabell 6 nedan). Detta tyder på en för enkel tryckekvation och på behovet av en bättre beskrivning av sprängämnet.

Trycket har hittills gällt explosionstrycket P_e. Men detta är bara lika med språnghålstrycket P_h om språnghålet är fulladdat. I praktiken frikopplas laddningar ofta i konturen för att sänka trycket och för att reducera skadorna. Man erhåller då det så kallade språnghålstrycket P_h som delvis bestäms av frikopplingsexponenten 2 γ (tabellerna 5, 6).

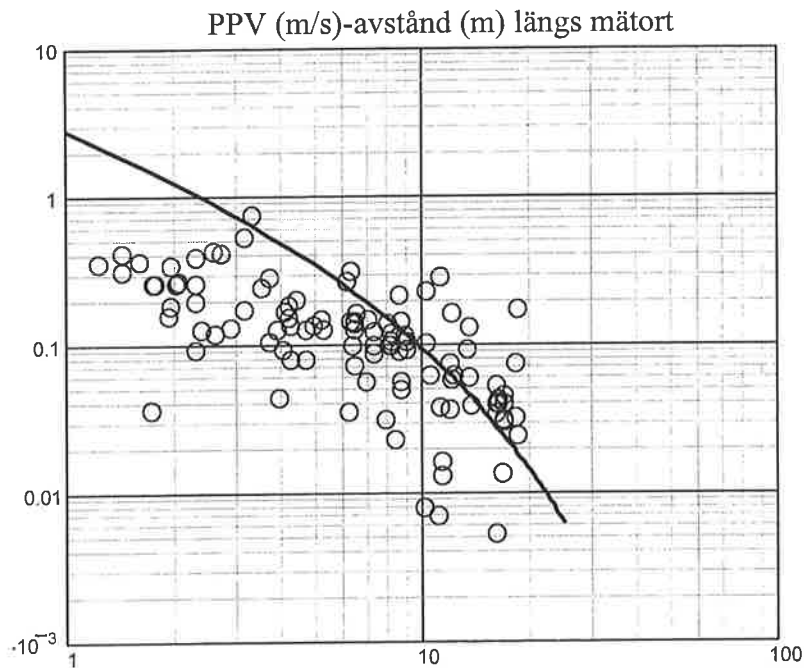
Tabell 6: Parametrar i dämpningslagen från 105 stycken PPV-värden i riktning längs mätort. Inverkan av frikoppling och laddningens placering i språnghålet är medräknad.

Hustrulid, nollförsök längs mätort

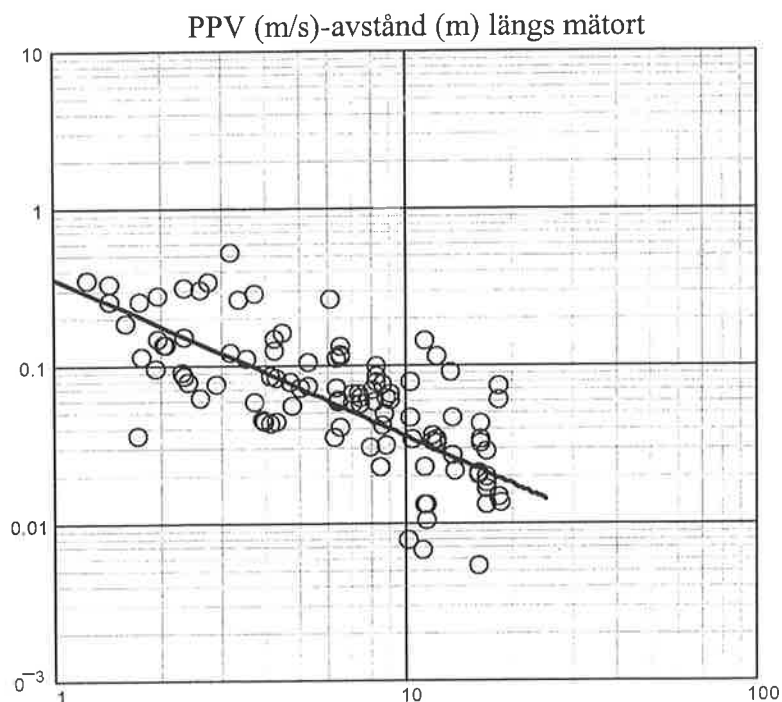
Parametrar	A	I	2 γ	δ	r ²
P _e enligt ekv. (2.2)	4,16	-0,11 ± 0,04	1,97 ± 0,82	0,39 ± 0,41	0,65
Fritt A	1,99 ± 0,34	0,01 ± 0,03	1,15 ± 0,49	-0,04 ± 0,25	0,61

Datapassningen r² för Hustrulids ekvation har beräknats (Chatfield 1978) i log-log planet för att bli jämförbar med Holmberg & Persson. Därför är r² inte nödvändigtvis högst när alla parametrar är fria.

En jämförelse av figurerna 17 och 18 nedan visar tydligt att den ursprungliga formen av dämpningslagen, med konstanten A beräknad ur uppmätta och givna sprängämnesdata ur ekvation (2.2), inte förmår återge mätvärden nära laddningar korrekt.



Figur 17: Log-log-diagram för svängningshastighet PPV plottad mot avstånd för dämpningslagen med givet A - värde. I mätningarna (cirklarna) som är enskotts försök har hänsyn tagits till kopplingsgraden f .



Figur 18: Log-log-diagram för svängningshastighet PPV plottad mot avstånd för dämpningslagen med fri konstant A . I mätningarna (cirklarna) som är enskotts försök har hänsyn tagits till kopplingsgraden f .

4.3 Sammanfattning av nollförsöket

En korrelation av oberoende variabler har visat att mätningarna kan innehålla överlagrad information. Tvärs mätorten har en korrelation av kopplingsgraden f med avståndet L fått värdet 0,786 vilket sannolikt är för högt. Det finns alltså delvis samma information i dessa två variabler.

En korrelation av oberoende variabler i riktning längs mätorten har visat att mätningarna är mindre beroende av varandra och att korrelationstalen därför är lägre. Den finns därför lägre risk för överlagrad information som kan skapa problem vid beräkningar.

Vågutbredningshastigheterna c från enskottsladdningar i de två olika riktningarna beräknades till:

- 6273 m/s för riktning längs mätort och
- 4881 m/s för riktning tvärs mätort.

I området stryker ibland foliationer sub- parallellt med mätorten. Dessutom ligger dominerande huvudspänningsriktningen i området längs mätorten. Detta kan förklara den ca 20% lägre vågutbredningshastigheten tvärs mätort.

När det gäller lutningen β och dämpningen I så har alltså dessa konstanter sina största värden tvärs mätorten vilket tyder på att bergets riktningsberoende egenskaper har en stor betydelse för resultatet.

Införandet av kvadratrotskalning i ekvation (1) har medfört en liten förändring av platskonstanterna. Frikopplingsexponenten 2γ och volymexponenten δ har visat sig bli nära noll. Införandet av fri konstant A i dämpningslagen (2) har medfört en markant bättre återgivning av mätvärdena och signifikant förändrade värde på dämpningen I . Frikopplingsexponenten blev för både fritt och givet A - värde skild från noll.

5 RESULTAT FRÅN ORTDRIVNINGEN

Under projektets två ortdrivningsfaser registrerades accelerationssignaler från 6 stycken salvor i malm och 4 stycken salvor i gråberg. Av det stora antalet uppmätta signaler från enskilda spränghål har vi integrerat och analyserat ett mindre antal. Det är huvudsakligen strosshålen och konturhålen nära mätpunkterna som använts för skadeprognoser.

5.1 Malmförsök

De först genomförda ortförsöken var i malm. Dessa har rapporterats i sin helhet (Nyberg & Fjellborg 1999) och vi nöjer oss här med att visa huvudresultaten från två ortsalvor. Alla

mätningar gjordes i riktningen tvärs mätort och utfördes i pelaren på höger sida om drivningsorten. Mätprincipen var den samma som för nollförsöken.

5.1.1 Mätningar

En utsortering av vissa mätningar var nödvändig och salvorna 1, 2 och 6 som bedömdes svårutvärderade har sorterats bort. Salvorna 3 och 5 initierades med elektroniska kapslar och var av detta skäl lättare att utvärdera. Resultaten visas i kommande avsnitt. Salva 4 var momentant initierad i konturen. Detta ledde till problem vid utvärdering (nästa avsnitt).

5.1.2 Platskonstanter tvärs mätort

De beräknade konstanterna är alltså typiska för mätplatsens geologi. Analyserna är baserade på 79 stycken signaler från identifierade sprängladdningar i salvorna 3 och 5. De två resultaten (tabell 7) från beräkningar med skalningslagen ekvation (1.2) är huvudsakligen likvärdiga.

Tabell 7: Parametrar i ekvation (1) från ortsalvor mätning tvärs mätort.

Holmberg och Persson, tvärs mätort

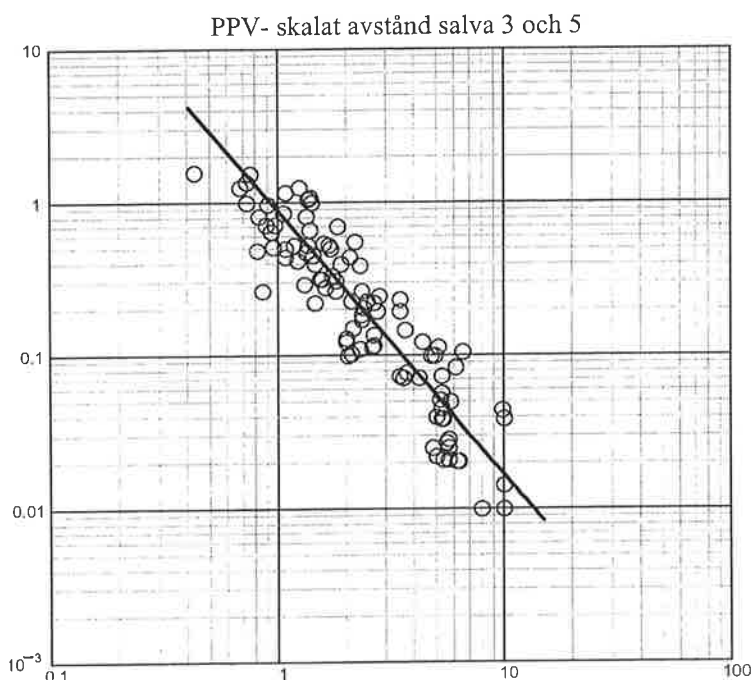
Parametrar	A (m/s)	α	β	2γ	r^2
Alla fria	$1,04 \pm 0,30$	$0,73 \pm 0,15$	$1,72 \pm 0,15$	0	0,85
Kvadratrotsskalning	$0,85 \pm 0,15$	$\alpha=\beta/2$	$1,72 \pm 0,15$	0	0,84

Några momentant initierade konturhål har inte använts vid beräkning av platskonstanterna. Orsakerna till detta kan kort sammanfattas:

- Pulserna utgår approximativt samtidigt från alla laddningar i konturen och
- sträckorna från laddningarna till någon godtycklig mätpunkt varierar något.

Resultatet av detta kan bli att mätsignalerna består av överlagrade enskilda pulser. Genom integration av *den sammansatta* signalen får man amplituder som varierar beroende av tidsförskjutningen mellan de enskilda signalerna i mätpunkterna. Signalerna blir därför mycket svårtolkade och resultaten skulle sannolikt blir sämre.

En uppskattning av platskonstanterna (tabell 7) visar att dessa är tillräckligt lika för de två fallen för att användning av kvadratrotsskalning skall vara möjlig. Om vi för skalningslagen sätter in parametrarna i $PPV = A (\sqrt{(g(H/R)Q)/R^\beta})$ samt plottar mätvärden och passningslinjen får vi resultatet som visas i figur 19. En mindre, icke signifikant, avvikelse kan noteras vid jämförelse av platskonstanterna med tidigare beräknade. Detta beror på att vi nu har använt ANFO-ekvivalenta laddningsvikter.



Figur 19: Log-log-diagram för svängningshastighet PPV (m/s) plottade mot skalade avståndet $R/Q^{0,5}$ tvärs mätort för skalningslagen.

När det gäller tillämpningar av Hustrulids prognosekvation så beräknas såväl i ortförsöket som i nolförsöket parametrarna i magnetitmalmen med hjälp av ekvationerna (2), (2.1) och (2.2). Möjligheten till en mindre modifiering av den exponentiella dämpningstermen har undersökts. Ändringen består i att exponenten $IR / (0,61\phi h)$ i e-faktorn ersätts med $I(R - 0,61\phi h)$ för att dämpningen skall bli noll på borrhålsväggen för enhetsladdningen $d v s$ när avståndet $R = 0,61\phi h$ (Hustrulid, 1998).

För övrigt har en ny bestämning av våghastigheten medfört att parametrarna skiljer sig något från den tidigare (Jinnerot & Nilsson 1998).

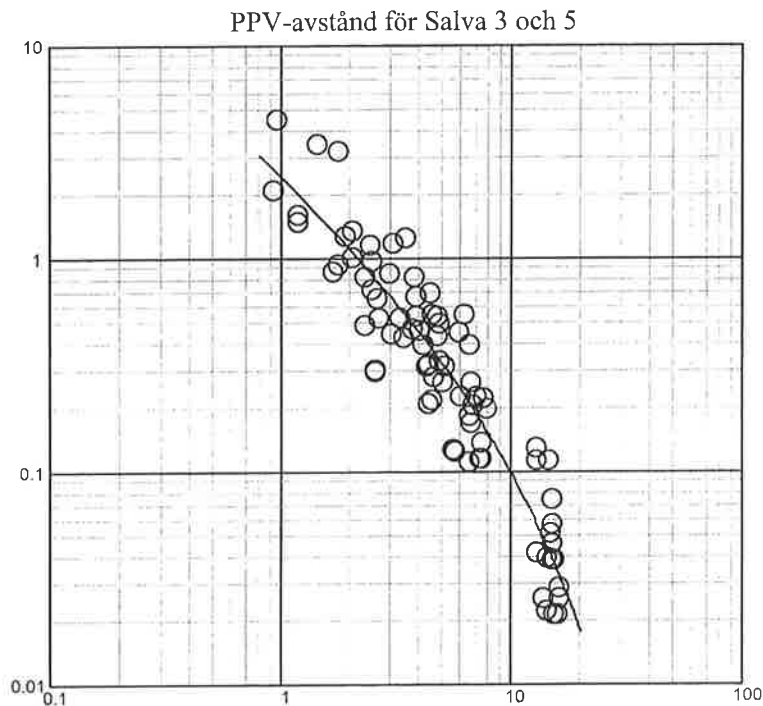
I tabell 8 har vi som tidigare konstanten A , bergdämpningen I och den adiabatisk konstanten 2γ . För givet A - värde är språnghålstrycket beräknat ur ekvationerna (2.1, 2.2). En frisläppning av interceptet gav, som tidigare, en minskning av värdet av konstanten A vilket kan tolkas som en sänkning av språnghålstrycket. Notera att ortsalvorna var laddade från hålbotten $d v s L \approx 0$ och att faktorn $\eta(L) = 1$, $d v s$ att L -beroendet utgår.

Tabell 8: Parametrar till dämpningslagen (2) ur salvorna 3 och 5 tvärs mätort.

Hustrulid, tvärs mätort

Parametrar	A m/s	I	2γ	r^2
Fritt A	$3,99 \pm 0,18$	$0,10 \pm 0,02$	$1,40 \pm 0,30$	0,86
Fritt A	$3,59 \pm 0,22$	$0,07 \pm 0,03$	0	0,75
P_e enligt ekv. (2.2)	4,77	$0,17 \pm 0,02$	$2,02 \pm 0,35$	0,85

Figur 20 visar minsta kvadrat passning av dämpningslagen till mätningar tvärs mätorten. De aktuella parametrarna gäller för fri konstant A med $r^2 = 0,86$ (tabell 8).



Figur 20: Log-log-diagram för svängningshastigheten PPV (m/s) plottad mot avståndet (m) för dämpningslagen med fri konstant A. I mätningarna (cirklarna) som gäller stross och kontur har hänsyn tagits till kopplingsgraden f.

För skalningslagen (1) kan man konstatera att kvadratrotsskalning är en god approximation med frikopplingseffekten och frivolymsseffekten lika med noll. För dämpningslagen (2) varierar dämpning en del, fast inte fullt så mycket som för nollförsöken. Vi nöjer oss därför med att visa ett resultat med fritt A-värde (figur 20).

5.1.3 Funktionskontroll malmförsök

En funktionskontroll av ortdrivningen i ort 406 genomfördes utifrån uppmätta accelerationssignaler och de nominella tider för sprängsalvorna som erhöles av Kimit AB. Metoden gick ut på att hitta en puls vid den nominella tiden. Om inte detta lyckades ansågs något fel i funktionen föreligga. Kontrollen från malmförsöken visade följande resultat:

Salva nr:	1	2	3	4	5	6
Identifierade:	23/30	18/26	24/30	23/26	24/31	10/12
%:	77	69	80	88	77	83

Metoden är naturligtvis indirekt i den meningen att signalen måste överföras från spränghålet till mätpunkten. Om avståndet är långt, signalen svag e t c kan dessa vara svårdetekterade på grund av den naturliga dämpningen i berget. För övrigt har en funktionskontroll utförts (Reidarman 1999). Notera att för salva nr 6 gäller funktionen endast kilen.

5.1.4 Slutlig bestämning av platskonstanter i malm

Det har visat sig att mätningarna från nollförsöken tvärs mätort och ortsalvorna 3 & 5 tvärs mätort kan slås samman. I tabell 9 och 10 sammanfattas dessa resultat. För riktning längs mätort har vi nollförsöken med korta ca 0,5 m punktladdningar. För helheten visas dessa ånyo. Alla korrigeringar för utsträckta laddningar e t c som använts tidigare gäller även här.

Tabell 9: Slutlig bestämning av parametrar i ekvation (1) efter sammanslagning av nollförsök och ortsalvor till totalt 99 stycken PPV-värden för riktning tvärs mätort respektive 105 stycken värden för riktning längs mätort. Notera att $\delta = 0$.

Holmberg och Persson

Riktning	A m/s	α	β	2γ	r^2
Tvärs mätort	0,94± 0,28	0,82± 0,12	1,75±0,16	0	0,84
Tvärs mätort Kvadratrotsskalning	0,85± 0,16	$\alpha=\beta/2$	1,73±0,15	0	0,83
Längs mätort	0,34± 0,17	0,60± 0,34	0,92±0,18	0,33±0,53	0,61
Längs mätort Kvadratrotsskalning	0,38± 0,15	$\alpha=\beta/2$	0,93±0,18	0,49±0,37	0,61

När det gäller ekvation (1) tvärs mätort har först en allmän regression visat dels att $\alpha/\beta = 0,47$ och dels att $2\gamma = 0$. Längs mätort gäller enligt ovan resonemang att $\alpha/\beta = 0,65$ och att parametrarna vid tillämpning av kvadratrotsskalning inte skiljer sig signifikant åt.

För dämpningslagen gäller samma analysgång som ovan. Först en allmän regression med alla parametrar fria. Sedan en reduktion av en parameter genom att ge värden för konstanten A, som förutsätts i dämpningslagen. Notera slutligen att en bestämning av δ tvärs mätort sannolikt saknar betydelse därför att avståndet L för ca 20 % av totala antalet mätningarna knappast har varierats (tabell 9 och 10). För övriga var $L = 0$.

Tabell 10: Slutlig bestämning av parametrarna i dämpningslagen efter sammanslagning av nollförsök och ortsalvor till totalt 99 stycken värden för riktning tvärs mätort respektive 105 stycken värden för riktning längs mätort. Notera att $\delta = 0$.

Hustrulid

Riktning	A	I	2γ	r^2
Tvärs mätort, fritt A	$3,78 \pm 0,28$	$0,10 \pm 0,03$	$1,57 \pm 0,46$	0,71
Tvärs mätort, givet A	4,77	$0,19 \pm 0,02$	$2,37 \pm 0,48$	0,76
Längs mätort, fritt A	$2,00 \pm 0,33$	$-0,01 \pm 0,03$	$1,10 \pm 0,39$	0,61
Längs mätort, givet A	4,16	$0,12 \pm 0,04$	$2,55 \pm 0,56$	0,68

Notera att i tabellen ovan fick vi ett positivt värde på I, i riktning längs mätort med fritt A - värde. Vid beräkningar av skador, i kommande avsnitt, sattes detta värde till noll av fysikaliska skäl. De bästa prognoserna utifrån "Coefficients of determination" r^2 sammanfattas (tabell 11) nedan.

Tabell 11: Bästa passning för alla mätningar i riktningarna tvärs mätort respektive längs mätort.

Passning	Holmberg och Persson r^2	Hustrulid r^2
Tvärs mätort	0,83	0,76
Längs mätort	0,61	0,68

Nästa steg är att undersöka giltigheten av konstanten 0,61 och givet explosionstryck i dämpningslagen (2).

För ett fulladdat språnghål ($P_e = P_h$) med given konstant A erhålls språnghålstrycket P_h tvärs mätort med ekvation (2.1) och (2.2) till 4,5 GPa. För fri konstant A blir $P_h = e^{3,78 \pm 0,28} \cdot 4800 \cdot 4881 / 0,61 \approx 1,68 \pm 0,28$ GPa. Eftersom konfidensintervallet inte innefattar värdet 4,5 GPa så är skillnaden signifikant.

Resultatet kan förklaras med att konstanten 0,61 i dämpningslagen som ges av den ekvivalenta sfäriska laddningens höjd, är olämpligt vald eller på att tryckekvationen (2.2) är för enkel.

Mot bakgrunden av detta samt svårigheten att mäta språnghålstryck och osäkerheten om hur stor del av utsträckta laddningar som påverkar PPV-värdena så kan en kombination av effekterna mycket väl förklara skillnaden.

Vi kommer nu att sätta in de bestämda konstanterna från tabellerna 9 och 10 i sina respektive ekvationer och titta på hur passningslinjerna förhåller sig till varandra. Notera först att för skalningslagen så använder vi inte här den vanliga skalningen på horisontella axeln utan istället endast avståndet R. För att visa på effekten av några olika laddningsvikter som vi

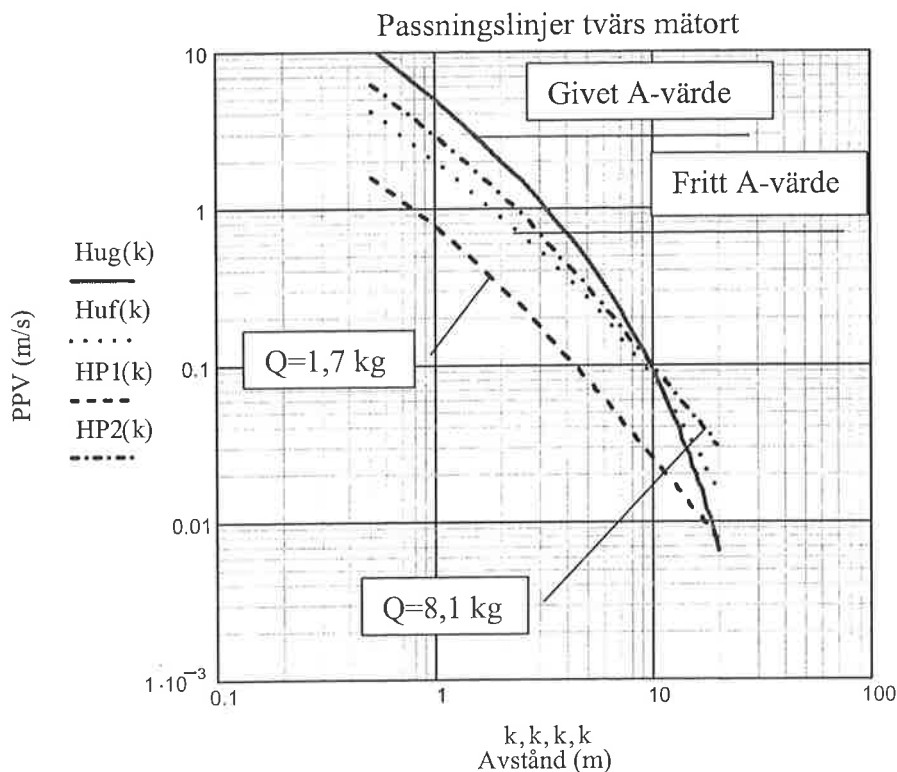
använt i ortsalvorna tvärs mätort så har dessa förts in i ekvation (1). De ANFO-ekvivalenta sprängämnesvikterna är 1,7 kg och 8,1 kg.

Prognosekvationerna som används (figurerna 21, 22) är alltså Hustrulid:s m.fl. och Holmberg och Persson:s med parametervärden enligt tabellerna 9 och 10. Om vi använder dämpningslagen tvärs mätort (figur 21) med given konstant $A = 4,8$ och dämpningen $I = 0,19$ gäller den heldragna linjen. För fri konstant $A = 3,8$ och dämpningen $I = 0,1$ gäller den prickade linjen. I uttrycket finns också en typisk spränghålsdiameter på $\phi 48$ mm. Linjen kröker sig som sagt något på grund av dämpningen I , i exponenten. Notera att $R \equiv k$. Uttrycket lyder:

$$Hu(R) = e^{A(0,048/R)} e^{-1R}$$

Om vi sedan tittar på ekvation (1.2) omskriven till skalningslag med sprängämnesvikterna $Q = 1,7$ kg (streckad linje) respektive $Q = 8,1$ kg (streckprickad linje) insatta och med korrektionen för laddningslängd (1.1) lyder uttrycket:

$$HP(R) = 0,85(\sqrt{g(H/R) Q}/R)^{1,73}$$



Figur 21: Log-log-diagram som visar given (Hug) respektive fri (Huf) konstant A för dämpningslagen och två sprängämnesvikter för skalningslagen.

För små värden på R d v s för små avstånd mellan laddning och godtyckliga punkter därifrån, så kröker linjerna något på grund av att korrektionsfaktorn $g(H/R)$ verkar på laddningen. Notera också att dessa linjer representerar de två ytterlighetsvärdena av Q i Holmberg och Persson:s ekvation.

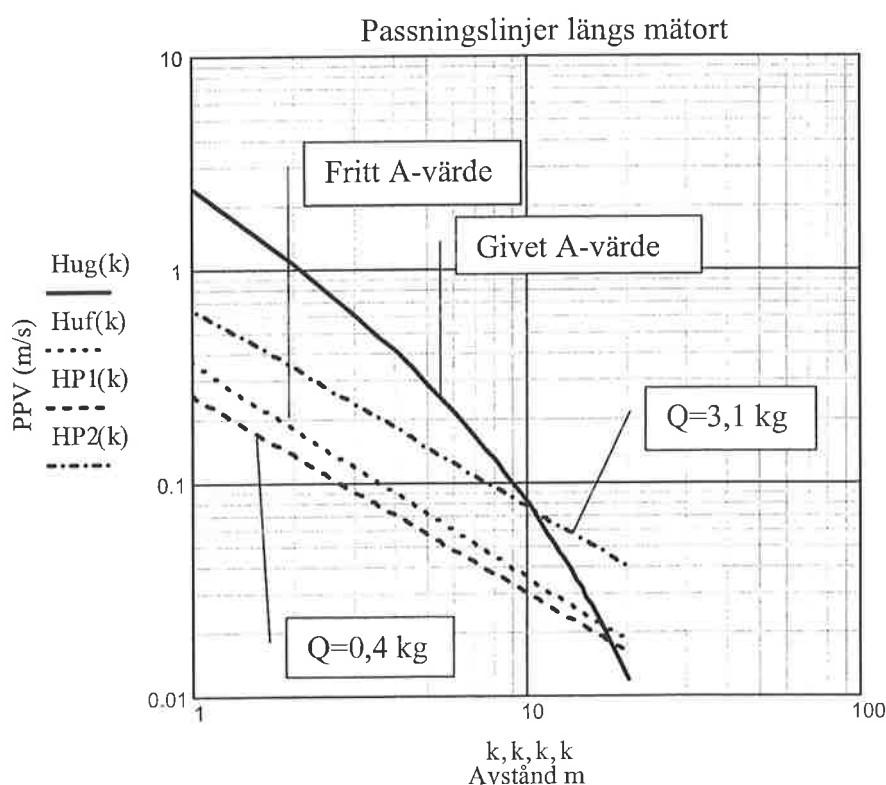
Om vi sedan använder dämpningslagen i riktningen längs mätort (figur 22) med given konstant $A = 4,2$ och dämpningen $I = 0,12$ så gäller den heldragna linjen. För fri konstant $A = 2,0$ och dämpningen $I = 0$ har vi den prickade linjen. Ekvationerna lyder:

$$Hu(k) = e^A(0,048/k) e^{-I R}$$

Notera också att den undre prickade linjen med fritt A -värde återger mätdata betydligt bättre än den övre heldragna, vilket visades tidigare (avsnitt 4.2 figurerna 17, 18).

Sedan har vi $Q = 0,4$ kg respektive $Q = 3,1$ kg insatt i skalningslagen vilket ger:

$$HP(k) = 0,38(\sqrt{g(H/R) Q}/R)^{0,93}$$



Figur 22: Log-log-diagram som visar givet (Hug) respektive fritt (Huf) A -värde för dämpningslagen och två sprängämnesvikter för skalningslagen.

Här gäller att laddningarna är 0,5 m långa och därför blir korrektionsfaktorn (1.1) försumbar för de aktuella avstånden R. Figuren visar linjerna HP1(k) respektive HP2(k) för de två sprängämnesvikterna.

5.1.5 Sprickkartering

Sprickkarteringen var svårtolkad (visas i appendix). Malmen var mycket söndersprucken i försöksområdet. Den var grovkornig 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 sågsnittet mycket svårtolkade och de vanliga sprängningsrelaterade sprickorna som vanligen kan hittas (t ex i Vångagranit) var svåra att finna.

5.2 Gråbergförsök

Analysen av gråbergförsöken är huvudsakligen utförd på samma sätt som för malmförsöken med fyra undantag.

- Vi utförde inte några nollförsök.
- Vi mätte i endast en riktning tvärs mätorten.
- Bestämning av platskonstanter för enskilda salvor var inte möjlig på grund av för litet underlag, men vi bedömde att överensstämmelsen mellan konstanterna för salvorna var tillräckligt bra utifrån resultaten från malmförsöken.
- Vi antog ett värde för ljudvågshastigheten c som var oberoende av mätriktning.

Det antagna värdet för ljudvågshastigheten för syenitporfyr är 5847 m/s. För densiteten ρ gäller enligt LKAB att $\rho = 2714 \text{ kg/m}^3$.

5.2.1 Mätningar

Signalerna samlades in i tre mätpunkter på olika avstånd från ortkonturen istället för fyra som i malmen. För övrigt genomfördes mätningarna på samma sätt. Avstånden till spränghålen har varierat från ca 1-11 m. Avstånden mellan spränghål och närmaste mätpunkten skulle enligt planeringen vara ca 0,5 m men snedborring av salvorna har dels ändrat på avstånden och dels orsakat att flera mätpunkter gått förlorade.

Avsikten var som i malmen att från enskilda laddningar i stross och kontur från fyra salvor mäta accelerationssignaler och integrera dessa. Detta för att först uppskatta skador i ortkonturen med hjälp av ekvationerna (1) och (2) och sedan använda ett skadekriterium för senare jämförelser med karterade skador i sågsnitt. Sprängämnesmängder, sprängämnestyper, kopplingsgrad i konturen och momentan respektive icke momentan tidsättning varierades. Detta har redovisats i avsnitt 3.4.

Sammanlagt 48 stycken signaler har använts från de fyra salvorna för analysen och bestämningen av parametrarna i ekvationerna. Tyvärr blev det färre signaler än förväntat främst beroende av snedborring och för få inmätta spränghål. Någon individuell jämförelse mellan de fyra salvorna blev därför inte meningsfull.

Vi antog att mätvärdesvariationerna i gråberget var ungefär som för malmen därför att alla salvor precis som i malmförsöken sköts i en och samma ort och samma geologiska formation. Vi bedömde att en sammanslagning (48 stycken) av signaler var naturlig för fortsatt analys.

Från salva 1 kunde vi använda 7 hål av 15 inmätta dvs 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 som var intressanta för analysen var koncentrerade till höger sida dvs så nära mätpunkterna som möjligt. Nästa avsnitt visar resultaten från parameterbestämningen.

5.2.2 Platskonstanter

Platskonstanterna har precis som tidigare beräknats med hjälp av minsta kvadrat metoden och visas först i tabellerna nedan. Därefter visas passningslinjerna och ekvationerna med insatta parametrar. Till slut visas en jämförelse av linjernas läge tvärs mätorten. De insatta parametrarna gäller för skalningslagen (tabell 12) respektive för dämpningslagen (tabell 13).

Tabell 12: Parametrar i ekvation (1) från ortsalvor mätning tvärs mätort.

Holmberg och Persson, tvärs mätort

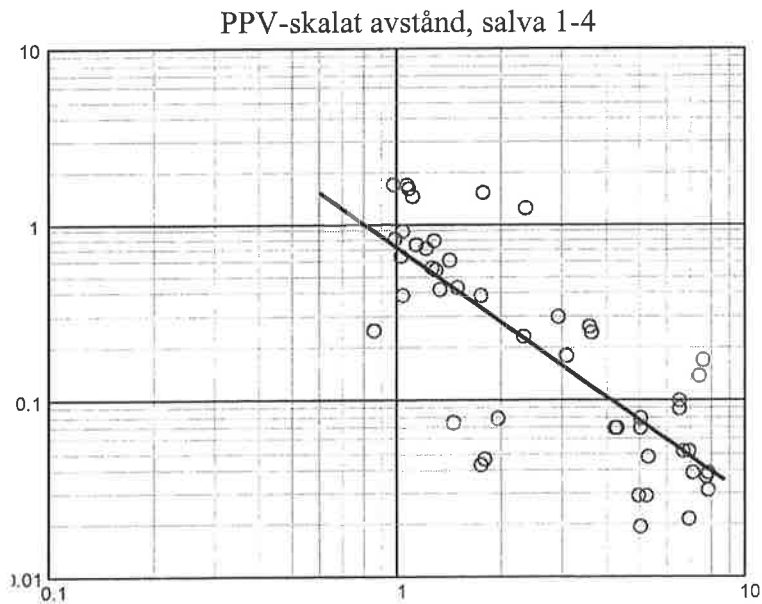
Parametrar	A (m/s)	α	$-\beta$	2γ	r^2
Fria	$0,61 \pm 0,44$	$0,84 \pm 0,35$	$1,39 \pm 0,33$	0	0,63
Kvadratrotsskalning	$0,86 \pm 0,58$	$\alpha=\beta/2$	$1,34 \pm 0,35$	$0,36 \pm 0,68$	0,63
Kvadratrotsskalning	$0,72 \pm 0,35$	$\alpha=\beta/2$	$1,40 \pm 0,33$	0	0,62

Tabell 13: Bestämningar av parametrar till dämpningslagen tvärs mätort.

Hustrulid, tvärs mätort

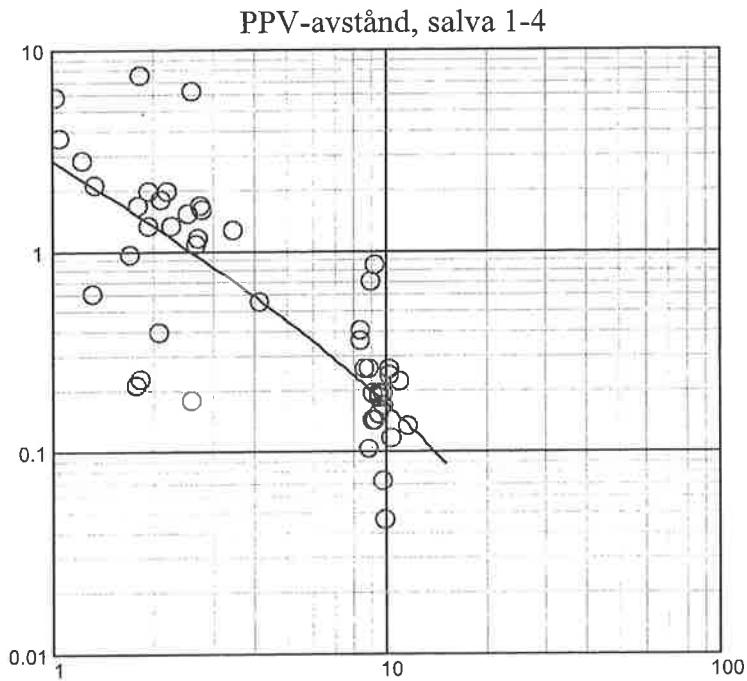
Parametrar	A m/s	I	2γ	r^2
Fritt A	$4,1 \pm 0,62$	$0,05 \pm 0,06$	$1,78 \pm 0,62$	0,67
P_e enligt ekv. (2.2)	4,8	$0,1 \pm 0,04$	$2,3 \pm 0,33$	0,73

Figur 23 nedan visar mätningar och linjen med insatta konstanter för skalningslagen (tabell 12). Frikopplingseffekten är svag eftersom att $2\gamma = 0,36 \pm 0,68$ och kan försummas.



Figur 23: Log-log-diagram för svängningshastigheten PPV (m/s) i gråberg plottad mot skalade avståndet $R/Q^{0.5}$ tvärs mätort för skalningslagen (kvadrattrotsskalning tabell 12).

Tabell 13 visar att A-värdet i dämpningslagen är något högre när trycket beräknas med ekvation (2.2). Likaså är dämpningen lägre men inte signifikant då intervallen överlappar varandra. Eftersom vi för malmen använt en modifierad dämpningslag med fritt A-värde så gör vi likadant här (figur 24).



Figur 24: Log-log-diagram för svängningshastighet PPV (m/s) plottade mot avstånd (m) för dämpningslagen med fritt A-värde (tabell 13). I mätningarna (cirklarna) som gäller gråbergsdata har hänsyn tagits till kopplingsgraden f .

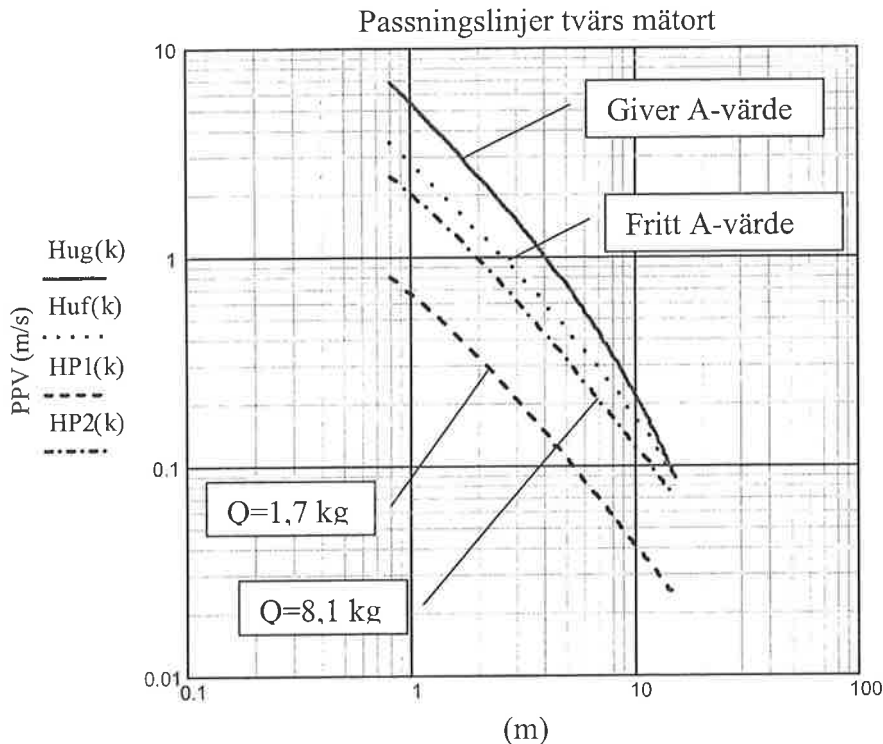
Passningslinjerna för båda lagarna visas tillsammans (figur 25) på samma sätt som för malmen. Dämpningslagen har för givet A - värde, $A = 4,8$ och $I = 0,10$ vilket beskrivs av den heldragna linjen. För fritt A - värde gäller att $A = 4,1$ och $I = 0,05$ dvs den prickade linjen. Uttrycket lyder:

$$Hu(k) = e^{A(0,048/k)} e^{-I k}$$

Om vi sedan tittar på skalningslag med sprängämnesvikterna $Q = 1,7$ kg (streckad linje) respektive $Q = 8,1$ kg (streckprickad linje) insatta tillsammans med korrektionen för laddningslängd (1.1) så lyder uttrycket:

$$HP(k) = 0,72(\sqrt{(g(H/k) Q)/k})^{1,40}$$

Notera att dessa linjer representerar de två ytterlighetsvärdena av Q för skalningslagen.



Figur 25: Log-log-diagram som visar givet (Hug) respektive fritt (Huf) A-värde för dämpningslagen och två typiska sprängämnesvikter $HP1$ respektive $HP2$ för skalningslagen.

Vi fick lägre r^2 värden än för ortsalvorna i malmen och färre antal användbara mätningar. Detta kan förklaras med att salvorna borrades snett och att förväntade mätresultat därför uteblev. En viss allmän osäkerhet fanns också på grund av detta vid analysen.

Vi bedömde också att mätbehovet inte skulle bli så stort som vid malmförsöken och mätningarna utfördes därför i tre mätpunkter i stället för fyra.

När det gäller ekvation (1) så har skalningslagen använts. Frikopplingseffekten har precis som för malmförsöken visat sig svag. För dämpningslagen (2) skiljer sig dämpningen knappt signifikant för givet respektive fritt A - värde. A - värdet självt däremot skiljer sig signifikant i de två fallen.

Mätvärdesanalysen för gråberget tillsammans med ett skadekriterium kommer att jämföras med de karterade skadorna (appendix) i sågsnitt.

Skallagarna och dämpningslagarna ovan säger inget direkt om de skador som uppkommer i ortkonturen bakom kvarstående halvpipor. Konstanterna kan endast tillsammans med ekvationerna åstadkomma en prognoslinje för PPV-värden beroende av avstånden till laddningar. Vidare behövs en kritisk PPV - nivå PPV_c då berget börjar att skadas. Detta visas i avsnitt 6.

5.2.3 Funktionskontroll gråbergsförsök

Endast salva ett har fullständigt kontrollerats. De andra har delvid kontrollerats främst på grund av att:

- Salva två har LP- kapslar blandat med elektronik och momentan initiering i konturen och
- salvorna tre och fyra har LP-kapslar blandat med elektronik.

Detta omöjliggjorde en tillfredställande kontroll. Funktionskontrollen visar:

Salva nr:	1	2	3	4
Identifierade: 40/47	-	-	-	-
%:	85	-	-	-

Allmänt bedöms funktionen vara ungefär lika god för alla fyra salvorna om man titta på de intressanta tidssekvenserna.

5.2.4 Sprickkartering

Gråberget visade sig precis som malmen vara uppsprucket vilket gjorde utvärderingen (visas i appendix) svår. Men på några ställen i konturen kunde vi hitta användbara nya radiella sprickor. Dessa har jämförts (avsnitt 7) med skadeprognoserna. Skadeprognoserna har alltså tagits fram ur skalningslagen och ur dämpningslagen tillsammans med ett skadekriterium för uppskattning av den kritiska svängningshastigheten (avsnitt 6) för respektive bergart.

6 KRITISK SVÄNGNINGSHASTIGHET

Den grundläggande storheter som orsakar skador i berget d v s töjningen ϵ_b kan beskrivas som $\epsilon_b = PPV/c$ (Persson m fl 1994). I en rapport (Bjarnholt & Skalare 1981) 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 med hjälp av uppgifter från gruvan och egna mätningar medför att kritisk svängningshastighet PPV_c kan uppskattas.

Prognosen för skadezonsdjupet som en enskild laddning orsakar utgår alltså ifrån att berget kan skadas när svängningshastigheten överskrider ett gränsvärde PPV_c . Kriteriet lyder:

$$PPV \geq PPV_c \text{ när } R \leq R_c \quad (3)$$

Från nollförsöken i magnetitmalmen har vi kunnat bestämma våghastigheten i två riktningar. Bergets densitet och tryckhållfasthet var känd av gruvan. Tryck- och draghållfastheten togs från litteraturen (Lama & Vutukuri 1978).

I gråbergsförsöken uppskattades ett värde på våghastigheten för syenitporfyr. Bergets densitet var känd och tryckhållfasthet togs också här från litteraturen (Lama & Vutukuri 1978).

För malmen gäller att genomsnittlig tryckhållfasthet $\sigma_c = 120$ MPa (gruvan), att densiteten $\rho = 4800$ kg/m³ (gruvan) och att de seismiska hastigheterna $c_{s1} = 6273$ m/s respektive $c_{s2} = 4881$ m/s (egna mätningar). Om vi ansätter att draghållfastheten σ_t är 6-7 % av tryckhållfastheten σ_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 kan uppskattas till 0,36 m/s tvärs mätorten och till 0,23 m/s längs mätorten.

För syenitporfyren gäller att genomsnittlig tryckhållfasthet uppskattas till $\sigma_c = 300$ MPa (gruvan), att densiteten enligt LKAB är $\rho = 2714$ kg/m³ och ljudvågshastighet $c = 5850$ m/s. Detta ger att PPV_c-nivån kan uppskattas till 1,10 m/s.

7 JÄMFÖRELSER MELLAN PROGNOSE OCH NYA RADIELLA SPRICKOR

För beräkning av PPV användes dels skalningslagen med insatta parametrar (tabell 12), dels dämpningslagen med parametrar (tabell 13). Typen av radiella sprickor som använts vid jämförelsen visas i appendix (gråbergsavsnittet, figur A10 och A11)). Andra spricktyper fanns också vilket försvårade utvärderingen.

För skalningslagen bedömdes en förenklad kvadratrotsskalning kunna gälla. Modifieringen av lagen $d v s$ införandet av en term för frikoppling visade inte på någon signifikant betydelse.

För att med hjälp av dämpningslagen kunna bibehålla den bästa beskrivningen av mätdata, som vid fritt A-värde, och samtidigt dra nytta av kända storheter (ekv. 2.2) har dessa förts in i lagen vid prognoserna. Storheterna är sprängämnesdensiteten ρ_e , VOD, bergdensiteten ρ och våghastigheten c . Dämpningslagen innehåller alltså i detta fall ett nytt fritt A-värde definierat av $(0,61/8) \eta$, med η som en fri passningsparameter (se även avsnitt 4.2). Notera att införandet av ett nytt värde på den fria parametern A inte påverkar resultaten $d v s$ linjerna beskriver mätdata på samma sätt som tidigare för fria A-värden. Passningsparametern η kan betraktas som ett godhetstal för hur bra dämpningslagen återger mätdata. Dämpningslagen används alltså på två sätt, i sin ursprungliga form och med ett fritt intercept. Skillnaden mellan resultaten har visat sig vara signifikant vilket framgår av tidigare avsnitt (figurerna 21, 22 och 25).

Foliationer som ligger subparallellt med drivningsorten är vanliga i malmområdet. Den maximala spänningsriktningen är approximativt längs drivningsorten. Detta kan förklara den ca 20% lägre vågutbredningshastigheten och större dämpningen tvärs orten. Sprickarteringen i malmen var svår att utvärdera (avsnitt 5.1.5 och appendix) och några säkra slutsatser kunde inte dras. Man kan konstatera att de vanliga sprängrelaterade sprickorna i t ex granit från

konturhål var svåra att återfinna i något av de fem sågsnitten. I stället uppträdde ofta naturliga sprickor i mönster över stora delar av sågsnitten.

Huvudresultaten från gråbergförsöken visas nedan (tabell 14) och gäller alltså de uppmätta spricklängderna jämförda med prognoserna. Dessa gäller kontur och 2:a kontur (hjälpåre). Resultaten visar att 2:a kontur med frikopplade Kimulux $\phi 32$ kan ge skador som närmar sig 1,5 meter. Detta tyder på att kvarstående berg kan varit belastat till en kritisk nivå vid upprepade tillfällen och att salvorna varit för starkt laddade. Fulladdade hål ($\phi 48$ och $\phi 64$) skulle naturligtvis orsaka betydligt större skador. Sprickarteringen, som var mer lyckosam här, genomfördes i sågsnitt på samma sätt som för malmen (appendix).

Skalningslagen förutsäger mindre skador för Kimulux än dämpningslagen i sin ursprungliga form. För Gurit som har lägre VOD förutsäger dämpningslagen mycket mindre skador.

De uppmätta spricklängderna är kortare än de förutsagda för båda lagarna. Ett undantag är Gurit med dämpningslagen. De absolut kortaste sprickorna kom inte oväntat från momentant initierad kontur (appendix). I detta fall utfördes inte några skadeprognoser på grund av begränsningar i prognoslagarna.

Notera att resultatet baseras på att kritisk svängningshastighet PPV_c uppskattas med en enkel formel (avsnitt 6) som till viss del är godtycklig.

En slående skillnad mellan de två lagarna är deras känslighet för sprängämnesegenskaper. Dämpningslagen som innehåller borrhålsttrycket förutsäger 5-6 gånger djupare skador från Kimulux än från Gurit med diametern $\phi 22$. När det gäller skalningslagen som innehåller sprängämnets vikt är skillnaden liten. De uppmätta sprickorna är ca en faktor två lägre för Kimulux. Tidigare har en faktor 1,7 rapporterats, (Olsson & Bergqvist 1996).

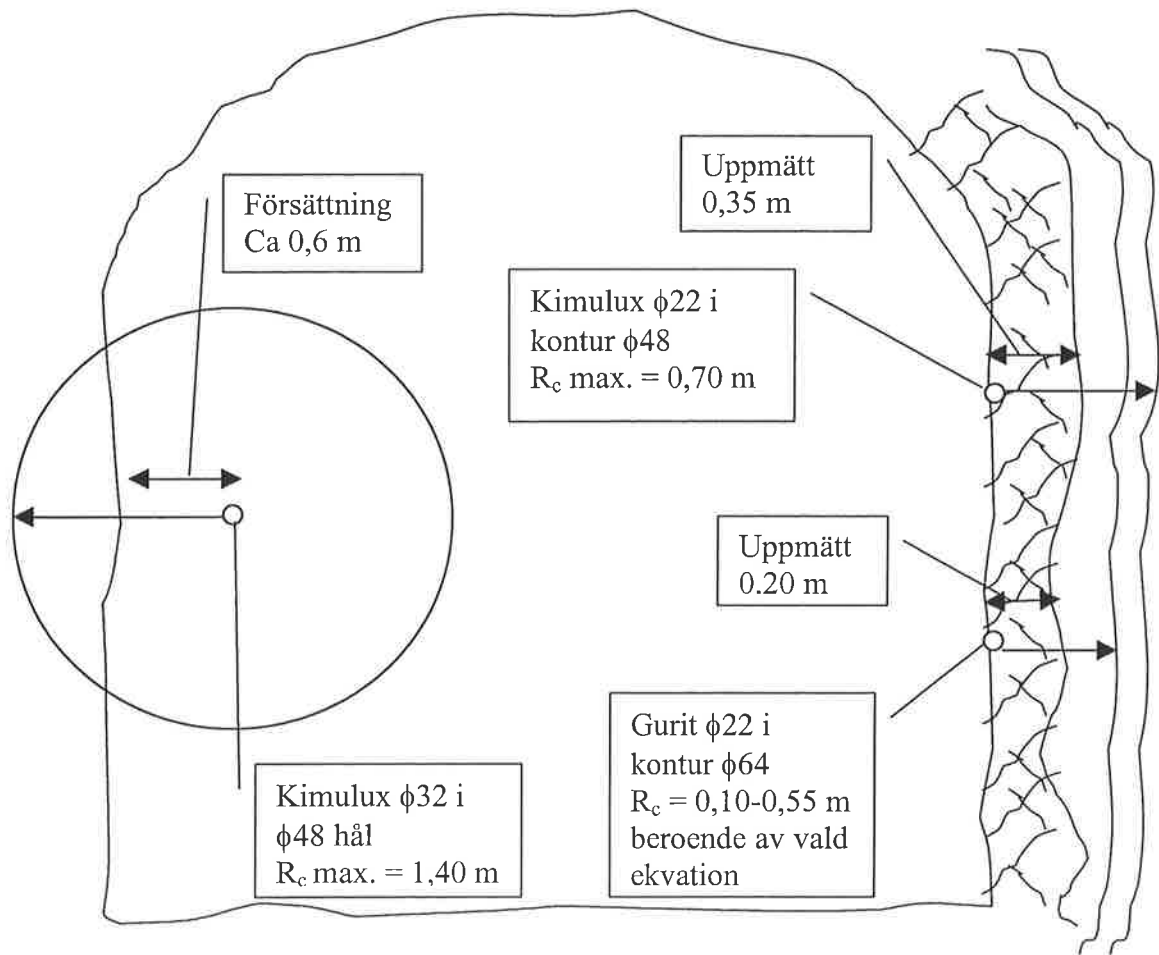
Vår slutsats är att sprängämnesbeskrivningen behöver förbättras för båda lagarna. Dämpningslagen innehåller dämpningen I som enda fria parameter. Men lagen kräver i sin ursprungliga form ej lätt tillgängliga berg- och sprängämnesparametrar som ingår i det givna A-värdet. Betydelsen av givet respektive fritt A-värde framgår nedan (tabell 14).

Skalningslagen kräver få och relativt enkla sprängämnesdata, d v s laddningsvikt och laddningslängd, som är lättbestämda.

Huvudresultaten från gråbergförsöken visas slutligen i tabell 14, med en jämförelse av skadeprognoserna med uppmätta spricklängder i sågsnitt. Vi har alltså använt den vanliga skalningslagen med kvadratrotsskalning och dämpningslagen med givet respektive fritt A-värde.

Tabell 14: Jämförelser av förutsagda skador med uppmätta spricklängder baserad på 4,5 m långa salvor. Konfidensnivå ca 70%. Kritisk PPV uppskattades till ca 1,1 m/s.

Salva Konturhåls - Diameter	Spräng - ämne	Skadezon R_c (m) Skalnings - lagen	Skadezon R_c (m) Dämpnings - lagen P_e från ekv.(2.2)	Skadezon R_c (m) Dämpnings - lagen Fritt A-värde	Uppmätta spricklängder (m)
1 Kontur $\phi 48$	Kimulux $\phi 22$	0,45-0,60	0,60-0,70	0,50-0,65	0,15-0,35
1 2:a Kontur $\phi 48$	Kimulux $\phi 32$	1,10-1,30	1,30-1,40	1,10-1,20	-
3 Kontur $\phi 64$	Kimulux $\phi 22$	0,45-0,60	0,45-0,50	0,40-0,55	0,15-0,40
3 2:a Kontur $\phi 48$	Kimulux $\phi 29$	1,05-1,30	1,25-1,40	0,85-1,00	-
4 Kontur $\phi 64$	Gurit $\phi 22$	0,40-0,55	0,05-0,10	0,05-0,10	0,10-0,20
4 2:a Kontur $\phi 48$	Kimulux $\phi 29$	1,05-1,30	1,30-1,40	0,95-1,00	-



Figur 26: Skadezonens djup i gråberg (ej i skala) från kontur och 2:a kontur. Cirkeln till vänster visar den maximal skadezonen från hjälparen. Skadorna från hjälparen kan sträcka sig djupare in i väggen än skadorna från konturhålen och mycke längre än försättningen. På höger sida visas uppmätta sprickor och prognoser. För Kimulux blir dessa maximalt 0,7 m. De uppmätta maximala skadorna är ca 0,35 m. Gurit på samma sida ger prognosskador 0,10-0,55 m beroende på valet av PPV- lag. Uppmätta maximala skador är ca 0,20 m.

8 SLUTSATSER

Rapporten visar att överensstämmelsen mellan skadeprognoiser och uppmätta radiella sprickor i gråberget kan variera betydligt beroende på valda sprängämnen och PPV- ekvationer. Följande slutsatser har kunnat dras:

- Dämpningslagen av Hustrulid m fl har modifierats något med ett fritt intercept för att få en bättre beskrivning av mätdata.
- Sprängämbesbeskrivning behöver förbättras för både Holmberg & Perssons skalningslag och dämpningslagen av Hustrulid m fl.
- Båda lagarnas prognoser visar på för stora skador jämfört med uppmätta sprickor i gråberget. Ett undantag är för Gurit med dämpningslagen.
- Vi kan inte ur materialet förorda den ena lagen framför den andra.
- Foliationer och huvudspänningar subparallellt med malmorten har sannolikt orsakat den lägre vågutbredningshastigheten och större dämpningen tvärs malmorten.
- Några skadeprognoiser vid momentan initiering av spränghål har inte utförts. Detta huvudsakligen på grund av svårigheter att utvärdera dessa signaler.
- Sprickkarteringsmetoden har visat sig ha vissa brister. Speciellt svårt var det att kartera malmen. Därför bör orsaken till att nya radiella sprickor ej framträtt undersökas.
- Det är fortfarande oklart vilken noggrannhet man skall förvänta sig av prognoserna.

9 ERKÄNNANDE

Vi vill passa på att tacka följande personer huvudsakligen verksamma i gruvan för medverkan i arbetet:

Leif Enbom, Kimit AB,
Sten Fernerud, FoU, gruvteknik LKAB
Karl-Einar Hansson, geologi, LKAB,
Lars-Erik Häggström, Kimit AB,
Bill Hustrulid, FoU, LKAB,
Anders Nordqvist, FoU, Kimit AB,
Lena Reidarman, sprängteknik, SveBeFo,
Ingemar Gunnarsson med flera, Turovaara Åkeri
Magnus Jinnerot och Henrik Nilsson, examensarbetare, CTH.

10 REFERENSER

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

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

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

Chatfield C 1978: "Statistics for technology, second edition", pp 177-178, J W, Arrowsmith, Ltd, Bristol.

Deng J, 1999:"A burning model for five emulsion explosives and some applications", SveBeFo Rapport 43, Stockholm.

Favreau R, 1969: "Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity", Journal of geophysical research, vol. 74, no. 17, Quebec.

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

Hansson K-E, 1998: Privat samtal.

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

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, Gyttopp.

Hustrulid W, 1998: Privat samtal.

Jinnerot M & H Nilsson 1998: "Experimentell studie av stötvågutbredning och skadezonsberäkning vid ortdrivning", Chalmers Tekniska Högskola, Examensarbete 1998:4, Göteborg.

Lama R D & V S Vutukuri 1978:"Mechanical properties of rocks",Trans. Tech. Publications, Claustal.

Nie S, 1999:"Borehole pressure in blast holes, measurements in granite blocks versus estimation", SveBeFo Rapport 42, Stockholm.

Niklasson B & M Keisu 1992: "Ny teknik för ort- och tunneldrivning-Sofia-projektet", SveDeFo rapport DS 1991:10, Stockholm.

Nyberg U & S Fjellborg 2000: "Ortdrivning och Skadezonsbedömning i LKABs Kirunagruva", Bergsprängningskommittén, Diskussionsmöte, BK 2000, Stockholm.

Olsson M & I Bergkvist 1996: "Crack length from explosives in multiple hole blasting", Proc 5th intl Symp Rock Fragmentation by Blasting, pp 187- 191, B Mohanty Ed, Balkema, Rotterdam.

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

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.

Ouchterlony F, S Nie, U Nyberg och J Deng, 1996: "Monitoring of large open cut rounds by VOD, PPV and gas pressure measurement", Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam.

Ouchterlony F, 1997: "Prediction of crack lengths in rock after caution blasting with zero inter-hole delay", SveBeFo Report 31, Stockholm.

Persson P A, R Holmberg och J Lee, 1994: "Rock blasting and explosives engineering", CRC Press, Boca Raton, Florida.

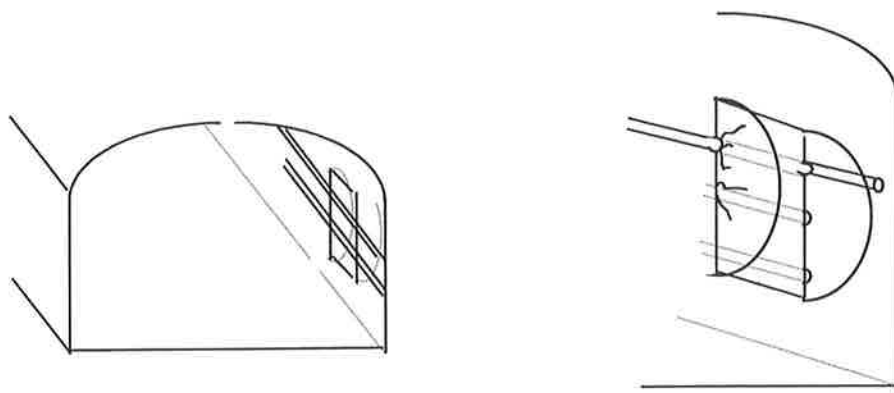
Reidarman L, 1999: "Reducering av luftstöt våg vid sprängning undermark, del 3", SveBeFo, arbetsrapport, Stockholm.

Wiberg U, 1993: "Material Characterisation and Defect Detection in Concrete by Quantitative Ultrasonics", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.

11 APPENDIX: SPRICKKARTERING

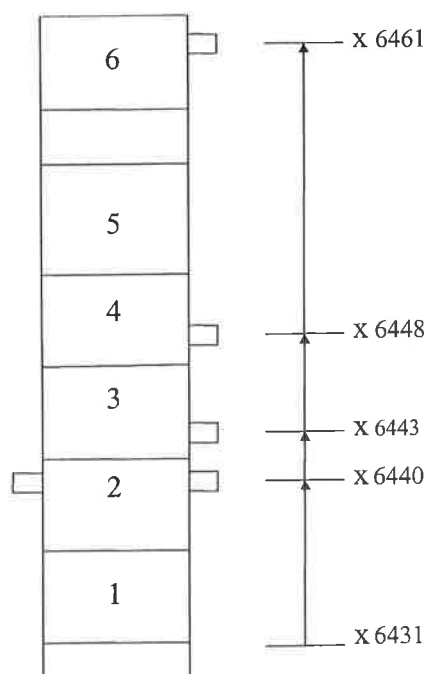
Malm

För att kunna verifiera giltigheten i de formler och tabeller som används vid prognoser av bergskador sågades ett antal slitsar i tunnelväggen. I figur A1 nedan visas slitsarna som var ca 0,5 m breda och 2,0 m höga och sågades till ca 0,5 m djup. Slitsarna sågades vinkelrätt mot borrhålshalvpiporna och vi försökte tvära åtminstone två pipor. Tekniken att undersöka sprickor i tunnelväggen har använts ett flertal gånger tidigare bl. a Malmberget (Fjellborg & Olsson 1996).



Figur A1: Slitsar som tvärrar kvarstående halvpipor.

På de kvarstående väggarna i slitsarna sprutades penetrantvätska som gör att alla sprickor framträder mycket tydligt. Den ursprungliga tanken var att såga sig in till den accelerometer som placerats närmast tunnelväggen och mitt i salvans längd. Här, på ca 0,5 m avstånd från väggen, var det intressanta området för skadezonen och här skulle man då kunna jämföra de uppmätta vibrationerna och jämföra dessa med den faktiska sprickbilden. Tyvärr gick det inte att placera slitsarna vid dessa sektioner då accelerometrarna hamnade fel p.g.a. felaktig utsättning. Vi fick därför placera slitsarna i några salvor där det fanns halvpipor kvar. Fem slitsar kunde sågas ut i försöksorten (figur A2). Sprickorna karterades, fotograferades och videofilmades.



Figur A2: Sågsnitt i orten.

Det skall genast påpekas att utvärderingen av sprickarteringen blev mycket svårtolkad. Detta beror på att malmen var mycket söndersprucken. Den tväras av flera spricksystem längs mätorten med orten vars stupningsriktning är 60-65 °. Malmen är dessutom grovkornig och strukturen och utseendet på sprickorna påminner om en pegmatit. Det fanns också gott om sprickor vinkelrätt från ortväggen men huruvida dessa kommer från sprängningen eller är naturliga sprickor är mycket svårt att säga då de inte verkar komma direkt från någon halvpipa på väggen.

Det är mycket troligt att skador också kommer från de med emulsion fulladdade hålen. Öppningshålen som var 64 mm och hjälparhålen 48 mm kan, enligt prognoserna, ge skador in i slutlig vägg.

Salva 2 vänster sida

- Momentan upptändning
- Vänster sida var laddad med strängemulsion
- 0,6 meter försättning

Resultat: Endast ett fåtal sprickor, dock inga sprickor från borrhålen. Det fanns också några vertikala sprickor från tak till sula samt några horisontella sprickor mellan borrhålen. Dessa kan eventuellt komma ifrån hjälparhålen (figur A3).



Figur A3: Sågsnitt vänster sida salva 2.

Salva 2 höger sida

- Momentan upptändning
- Höger sida var laddad med 22 mm Kimulux
- 0,6 meter försättning

Resultat: Här var berget mer uppsprucket än vid den vänstra sidan med ett nät av finare sprickor. Dock inte heller här några sprickor från konturhålen (figur A4).

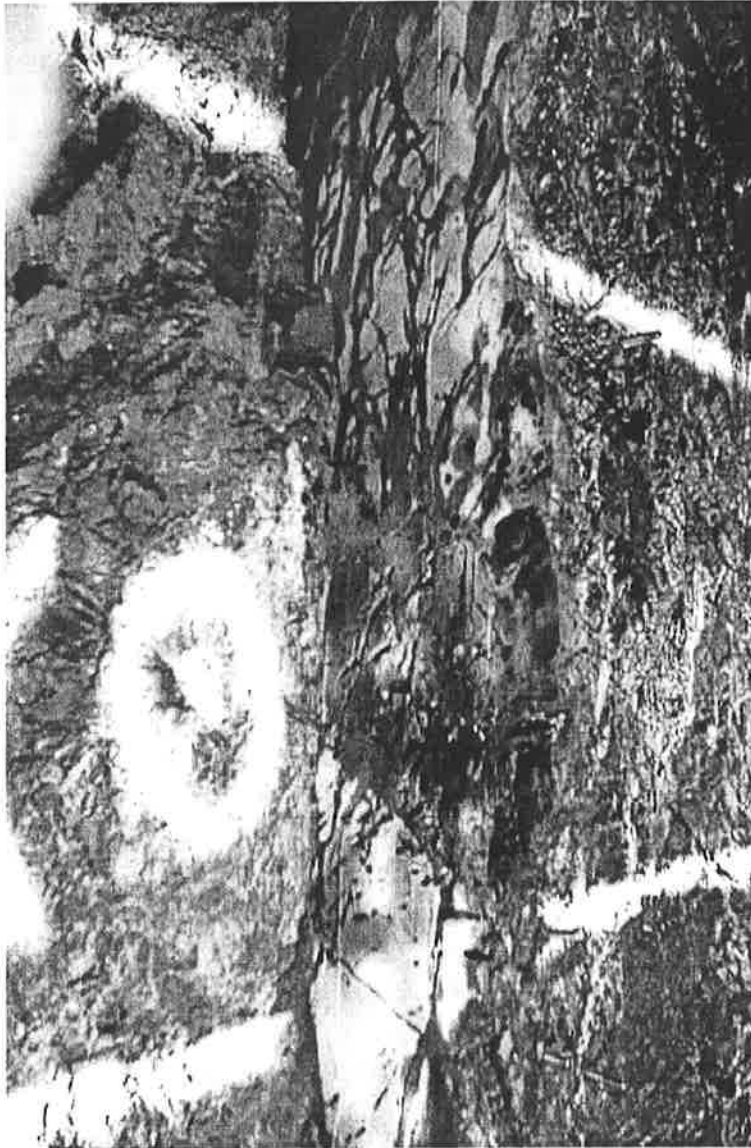


Figur A4: Sågsnitt höger sida salva 2.

Salva 3

- Icke momentan upptändning
- Laddad med patroner 22 mm Kimulux
- 0,6 meter försättning

Resultat: Sprickbilden är komplicerad. Det fanns mycket sprickor över hela snittet. Dessa sprickmönster är förmodligen naturliga sprickor som beror på malmens geologi. Även i denna salva fanns ett antal horisontella sprickor men dessa kommer troligen inte från något konturhål (figur A5). Sprickbilden kan jämföras med tidigare karteringar i bl.a. Vånga då man sprängt i granit som tvärats av pegmatitgångar där också materialet blev svårtolkat.

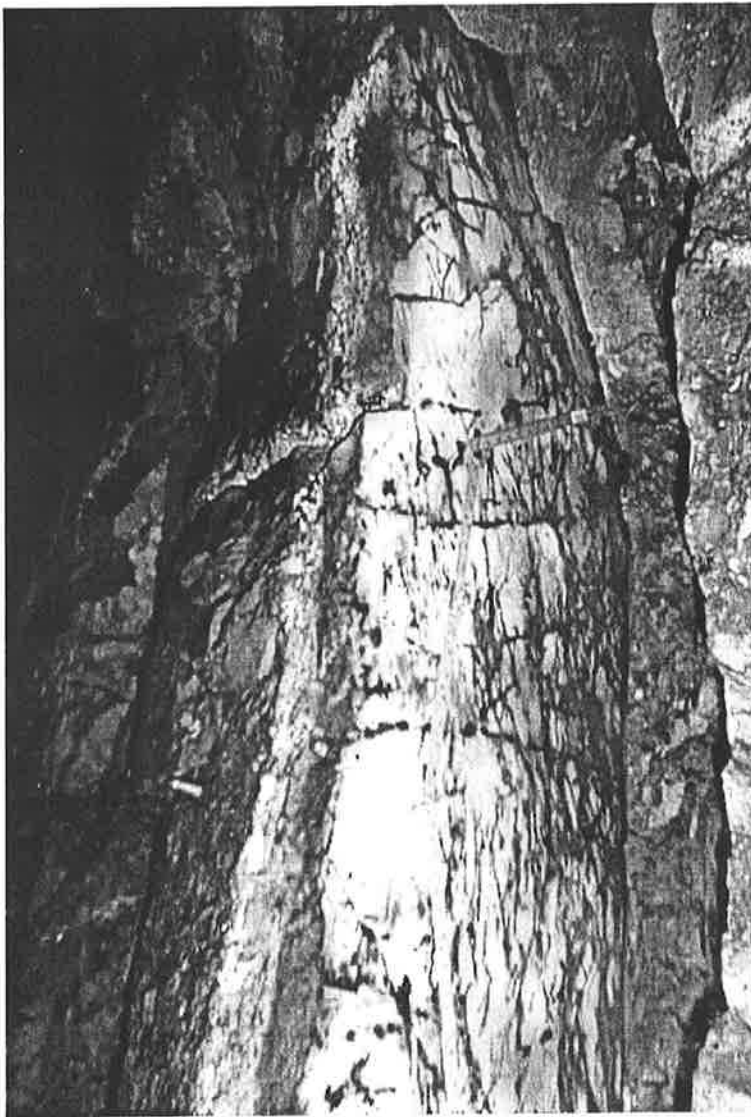


Figur A5: Sågsnitt salva 3.

Salva 4

- Momentan upptändning
- Laddad med 22 mm Kimulux
- 1,0 meter försättning

Resultat: Delar av höger sida, längst in, måste skjutas om. Detta kan bero på att försättningen här, p.g.a. stickning, blev större än planerat. Här fanns mycket sprickor i ett nätmönster samt i ett antal horisontella sprickor mellan hålen som kan vara naturliga men som också kan tänkas komma ifrån hjälpparraden. Vertikala kraftiga sprickor fanns mellan tak och sula (figur A6).



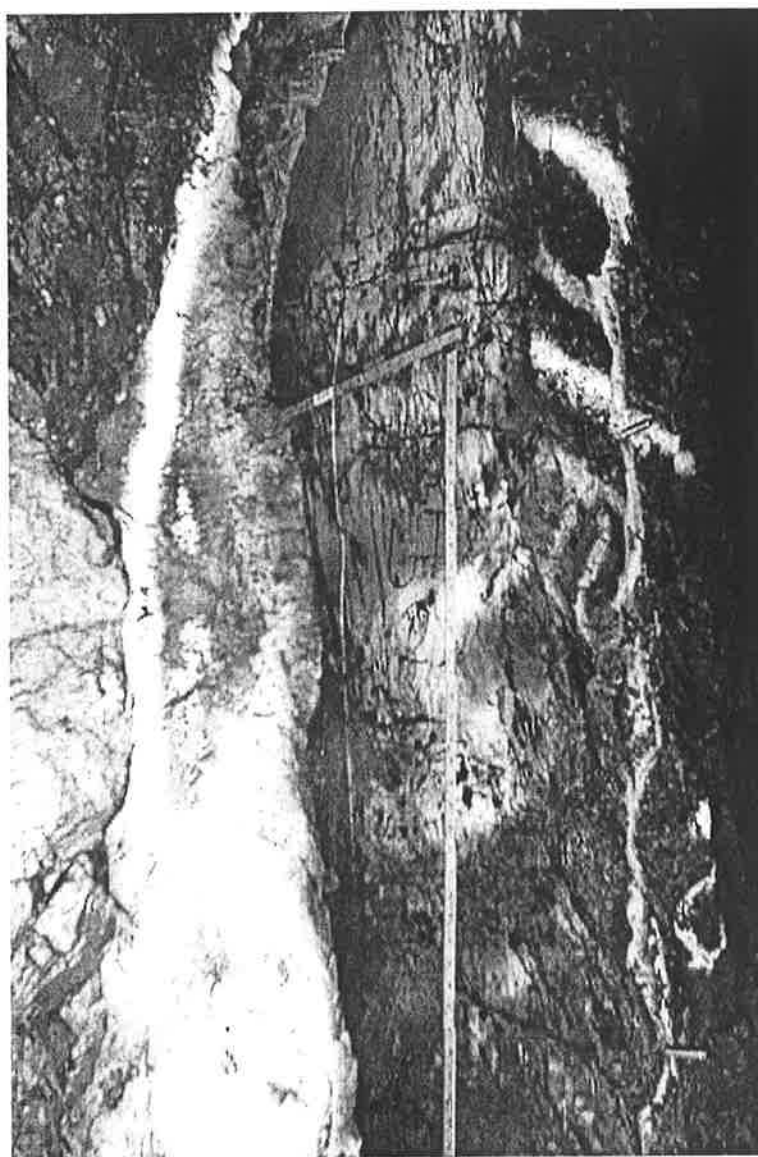
Figur A6: Sågsnitt salva 4.

Salva 6

- Icke momentan
- De olika hålen var laddade med i tur och ordning uppifrån och ned:

- 80 g pentylstubin, strängemulsion, strängemulsion, 22 mm Kimulux samt slutligen ett fulladdat hål med Kimulux
- 0,7 m försättning

Resultat: Salvans högra sida gick dåligt. Det fanns många kraftiga sprickor och stora gropar i snittytorna. Det förekom vattenförande slag som gjorde det svårt att applicera penetrantvätska och framkallare. Många vertikala sprickor mellan tak och sula. Snittet ligger så nära botten att det längst ned kan vara påverkat av bottenladdningen (figur A7).



Figur A7: Sågsnitt salva 6.

Sammanfattning

Salva 2 vänster: Det snitt som uppvisar minst sprickfrekvens

Salva 2 höger: Många fina sprickor på höger sida samt ett antal horisontella.

Salva 3: Mycket stort antal fina sprickor samt ett antal horisontella tydliga sprickor.

Salva 4: Många horisontella sprickor och fint sprickmönster runt dessa. De fina sprickorna verkar uppstå kring de grövre, jämförbart med högra delen av salva 2.

Salva 6: De kraftigaste sprickorna finns i detta snitt.

Det är svårt att tolka resultatet av sågningarna. De vanliga sprängrelaterade sprickor från konturhålen som syns väl i t.ex. granit var svåra att återfinna i något av snitten. De sprickor man såg var troligen naturliga sprickor eller sprickor från fulladdade emulsionshål. Vid tidigare utförda försök i Vånga i granit med emulsion, 22 mm Kimulux i 64 mm borrhål, blev spricklängden 20–30 cm och detta kunde förväntas även här. Krossprickor runt borrhålet saknades. Dessa brukar finnas då man använder sprängämnen med hög VOD, t.ex. emulsion.

Vid tidigare sprickkarteringar i Malmberget i malm var det också svåra att bestämma en riktig spricklängd ty också där var malmen mycket uppsprucken. I grovkornig malm som genomkorsas av många naturliga sprickplan kanske inte vår sprickkarteringsmetod är riktigt lämplig.

Eftersom de olika snitten visar upp stora variationer i sprickfrekvens och typ av sprickor har en jämförelse mellan de olika snitten gjorts med avseende på just dessa parametrar. Sprickorna har delats upp i tre olika kategorier; horisontella, vertikala och fina sprickor. Antalet av de tre olika spricktyperna samt den sammanlagda längden för de horisontella och vertikala sprickorna har mätts upp och sammanställts, se tabell A1.

Tabell A1: Sammanställning av olika spricktyper från karteringen.

Spricktyper	Horisontella			Vertikala			Fina
	Antal st	Total längd m	Genomsnitts längd m	Antal st	Total längd m	Genomsnitts Längd m	Antal st
Salva 2v	10	2	0,20	4	7	1,8	~40
Salva 2h	4	1	0,25				>100
Salva 3	5	1	0,20				>1000
Salva 4	8	4	0,50	2	5	2,5	>100
Salva 6	2	1	0,50	5	3	0,6	>100

Av tabellen framgår att salva 4 visar upp störst totallängd för de horisontella sprickorna och störst genomsnittslängd för såväl horisontella som vertikala sprickor. Salva 4 hade också minst antal synliga borrhålspipor. Andelen fina sprickor var mindre för den vänstra sidan av salva 2 än de övriga snitten och snittet vid salva 3 uppvisade betydligt fler fina sprickor.

En metod som brukar användas för att bedöma hur skonsamt sprängningen har utförts är att räkna mängden kvarvarande halvpipor från borrhålen. Detta är ett mått som dock inte säger något om hur uppsprucket berget är innanför ortväggen men ger en indikation på hur mycket berg som fallit ut från ortväggen som följd av sprängning och skrotning. En utvärdering enligt nämnda förfarande har genomförts och resultatet framgår av tabell A2.

Borrhålspipornas borrade längd var ungefär 5 m. Antal synliga meter delat med antalet borrade meter för de fyra borrhålen i konturen redovisas i nedersta raden.

Tabell A2: Synliga halvpipor

<i>Hål</i>	<i>Salva 2v</i>	<i>Salva 2h</i>	<i>Salva 3</i>	<i>Salva 4</i>	<i>Salva 6</i>
1	5,0 m	4,0 m	3,0 m	2,0 m	1,0 m
2	4,5 m	2,0 m	2,0 m	0 m	0 m
3	4,5 m	2,0 m	2,0 m	0 m	3,5 m
4	0 m	2,0 m	2,0 m	1,5 m	3,0 m
Synliga halv- pipor	70%	50%	45%	18%	38%

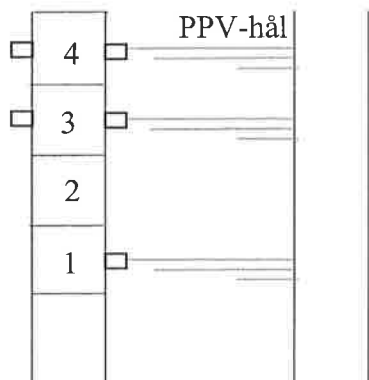
Salva 2 som sprängdes momentant med 0,6 m försättning visar upp störst andel synliga borrhålspipor. Detta var också väntat ty denna salva var momentan initierad och tidigare undersökningar har visat att man då uppnår flest synliga halvpipor (Olsson & Bergqvist 1997). Vänster sida av salva 2 där konturen laddades med strängemulsion uppvisar en större del kvarvarande borrhålspipor än den högra sidan som laddades med 22 mm Kimulux i rör. Det resultatet kan bero på den naturliga geologiska variationen eller att strängarna med emulsionssprängämne har varit så tunna att sprängeffekten från dessa hål varit mindre än effekten från de hål som laddades med 22 mm Kimulux. Tjockleken på strängen är svår att kontrollera eftersom utdragandet av slangen som pumpar emulsionen på plats skett för hand.

Salva 4, som också sprängdes momentant men med en meters försättning, visar upp den minsta andelen synliga borrhål. Detta skulle kunna tyda på att försättningen varit för stor men å andra sidan har tidigare undersökningar i Vånga visat att bergkvalitén i det kvarvarande berget inte påverkas av försättning då man spränger momentant.

Det kan dock var tveksamt att dra allt för stora slutsatser av resultatet eftersom urvalet är litet och de naturliga variationerna i berget är stora. Den efterföljande skrotningen har dessutom förmodligen rivit bort en stor del av borrhålsalvpiporna.

Gråberg

Sprickkarteringen genomfördes på samma sätt som i malmförsöket. I stället för 8 stycken planerade sågsnitt så blev det verkliga utfallet 5 stycken sågsnitt (figur A8). Resultatet av sprängningarna och speciellt antalet synliga halvpipor bestämde omfattningen. I salva 1, 3 och 4 kunde sågsnittet läggas exakt i samma sektion som mät hålen. I salva 2 fanns det inte kvar några halvpipor.



Figur A8: Sågsnitt i orten.

Resultat

Även gråberget visade sig vara uppsprucket vilket gjorde utvärderingen svår. Sprickor mellan hålen är troligen en kombination av naturlig sprickbildning samt skador från strosshål och öppningshål. Salvskrotningen har rivit bort en del av de synliga halvpiporna.

Det visade sig att salvorna i denna omgång har dragit åt höger. Detta berodde på ett tekniskt fel vid ortdrivningen. Några av salvorna, t ex salva 1 blev då för kort och hade endast 3,6 m indrift.

Salva 1 vänster sida

- 0,6 m försättning
- 48 mm hål
- 32 mm Kimulux i hjälpare
- 22 mm Kimulux i kontur
- ej momentan upptändning

Resultat: Relativt hög frekvens av naturliga sprickor mellan hålen. De finns två huvudsakliga sprickriktningar, dels sprickor parallellt med ortväggen och dels sprickor vinkelrätt från

ortväggen och in i berget. Närmast de två hålen finns det en högre frekvens av sprickor. Några längre radiella sprickor finns från hålen in i berget. Längsta radiella sprickan är 35 cm.

Salva 3 höger och vänster sida

- 0,6 m försättning
- 64 mm hål i kontur och 48 mm hål i hjälpare
- 29 mm Kimulux i hjälpare
- 22 mm Kimulux i kontur
- ej momentan upptändning

Resultat: Mycket uppsprucket berg. Huvudsprickriktningarna var 30-40° ovan och under horisontalplanet samt parallellt med ortväggen. Dessa sprickor är ofta kraftiga och öppna och synes därför vara naturliga sprickor i berget. Här går det inte att med säkerhet fastställa spricklängder från konturhål (figur A9).

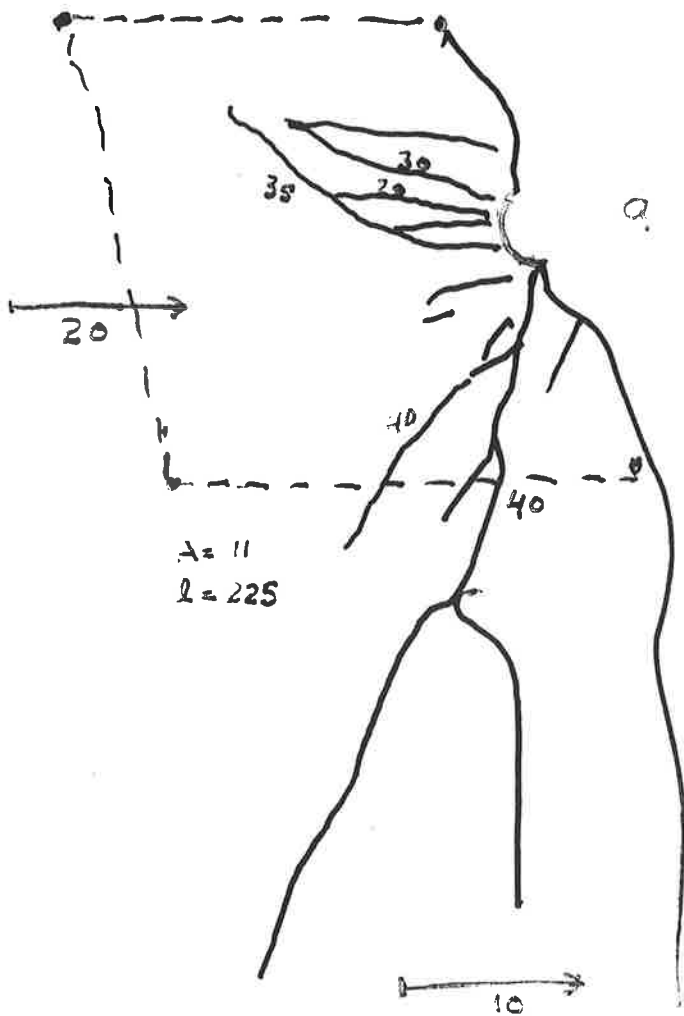
På vänstra sidan av orten togs också ett snitt. Här var sprickbilden något enklare och här syntes sprickorna från konturhålet (figur A10 och den ritade sprickbilden i figur A11). Den tydligaste bilden är runt det övre hålet. Här är den maximala spricklängden ca 40 cm. Denna spricka ser sedan ut att fortsätta över en horisontell befintlig spricka. Det finns sedan ett antal radiella sprickor runt hålet med en medelspricklängd på ca 30 cm. Från det undre hålet finns egentligen endast en tydlig spricka med en längd på ca 25 cm.



Figur A9: Sprickutbredning från salva 3 höger sida.



Figur A10: Sprickutbredning från salva 3 vänster sida.



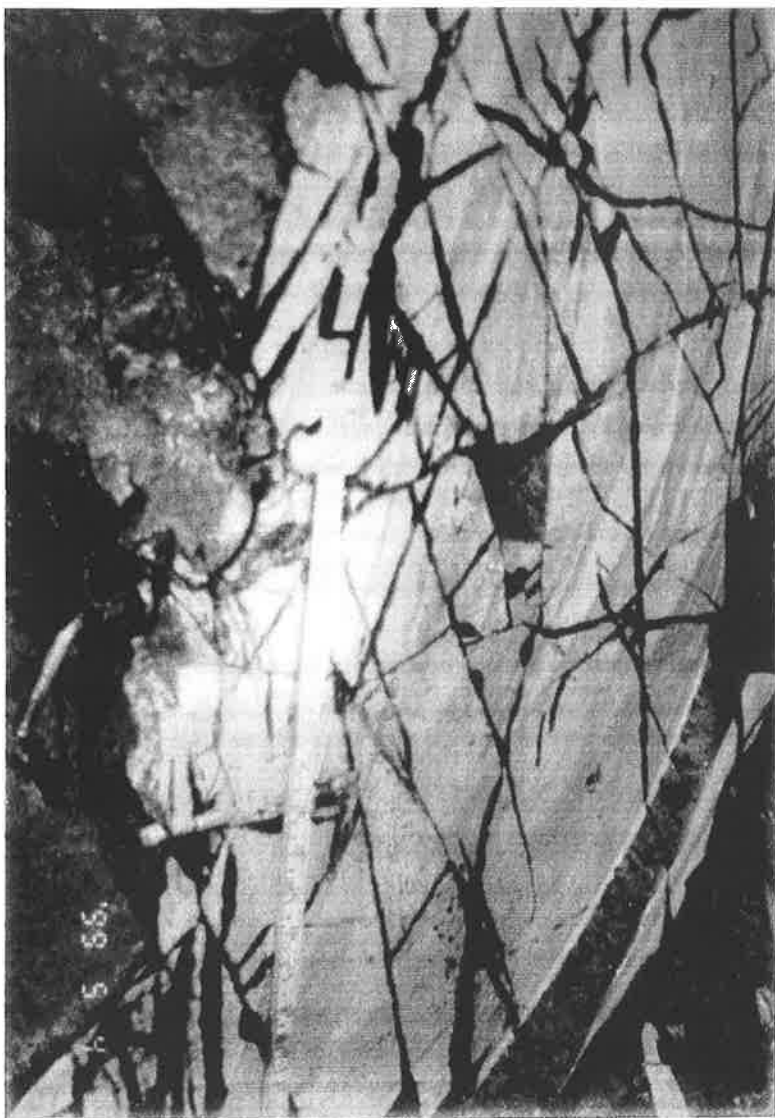
Figur A11: Ritad sprickbild från salva 3 vänster sida.

Salva 4 höger och vänster

- 0,6 m försättning
- 64 mm hål
- 29 mm Kimulux i hjälpare
- 22 mm Gurit i kontur
- momentan upptändning på vänster sida

Resultat: På höger sida var berget måttligt uppsprucket. De huvudsakliga sprickriktningarna var här dels horisontella samt vertikala sprickor. Närmast tunnelväggen var sprickfrekvensen högre och troligen påverkad av hjälpparraden. Bilden runt borrhålet var ganska komplicerad. Det finns ett antal radiella sprickor varav de längsta sprickorna är ca 20 cm långa.

På vänster sida, där hålen sprängts momentant, var sprickbilden annorlunda. Närmast borrhålet finns endast ett begränsat antal radiella sprickor varav den längsta sprickan är ca 15 cm lång (figur A12). Det finns också ett antal krossprickor runt hålen, vilket brukar vara vanligt för sprängämnen med hög detonationshastighet som t.ex. för Kimulux men är ovanligt för 22 mm Gurit. Längre in är berget mer uppsprucket troligtvis beroende på naturliga svagheter. Det är svårt att definiera speciella sprickriktningar men det förekommer grova öppna vertikala sprickor samt områden med mycket hög sprickfrekvens.

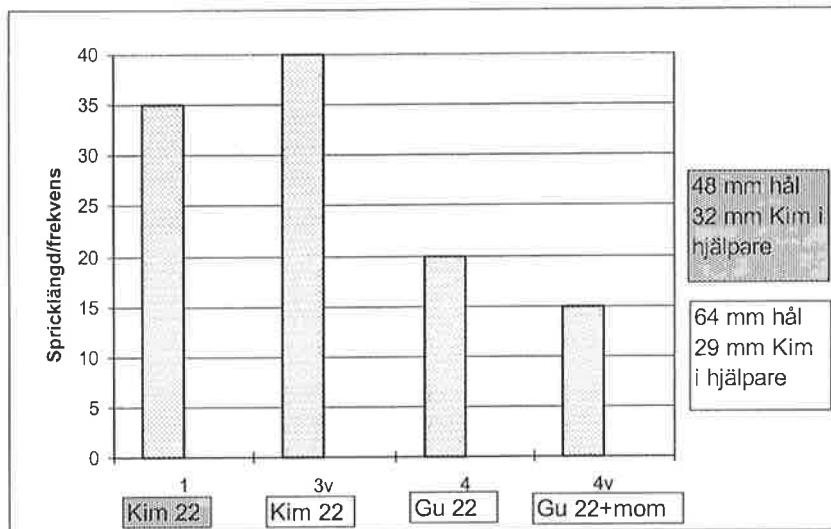


Figur A12: Sprickutbredning från salva 4 vänster (momentan upptändning).

Tabell A3: Spricksammanställningen gäller vänster (v) och höger (h) sida.

Salva	Hål ϕ mm	Laddn. ϕ Hjälp Kimulux	Laddn. ϕ kontur	Initier.	Max l. cm	Antal radiella sprickor	Sprickfrekvens	
							Antal	Längd (cm)
1v	48	32	22 mm Kim.	ej mom.	35	2	20	130
3v	64	29	22 mm Kim.	ej mom.	40	5	15	170
4h	64	29	22 mm Gu.	ej mom.	20	3	>30	>200
4v	64	29	22 mm Gu.	Mom.	15	3	>50	>250

Figuren nedan visar maximala spricklängder.



Figur A13: Kortaste sprickor med momentan upptändning och Gurit i konturen.