# MÄTNING OCH BEGRÄNSNING AV SPRÄNGSKADOR I KVARSTÅENDE BERG

Roger Holmberg

DS 1978:6 78-02-26

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION
BOX 32058 – 12611 STOCKHOLM
SWEDEN

Tryck nr B 408. 1.000. 3. 79. NORA BOKTRYCKERI 71535

# MÄTNING OCH BEGRÄNSNING AV SPRÄNGSKADOR I KVARSTÅENDE BERG

Roger Holmberg

DS 1978:6 78-02-26

Sammanfattning

Rapporten beskriver ett antal accelerationsmätningar som utförts i närheten av laddningar med koncentrationer från 0.2 - 75 kg per borrhålsmeter. Experimenten har utförts i pegmatit, gnejs och granit med draghållfastheter på 5-15 MPa. En matematisk modell över svängningshastigheten har visat sig stämma förvånansvärt bra med de experimentella värdena som erhållits via integration av accelerationerna. Skadezonsmätningar visar att sprickor induceras eller förstoras inom området 700-1000 mm/s. Den matematiska modellen kan tillsammans med skadekriteriet användas för att förutsäga skadezoner från en godtycklig laddningsgeometri.

Innehållet i rapporten presenterades på Bergmekanikdagen den 21 februari i Stockholm.

Summary

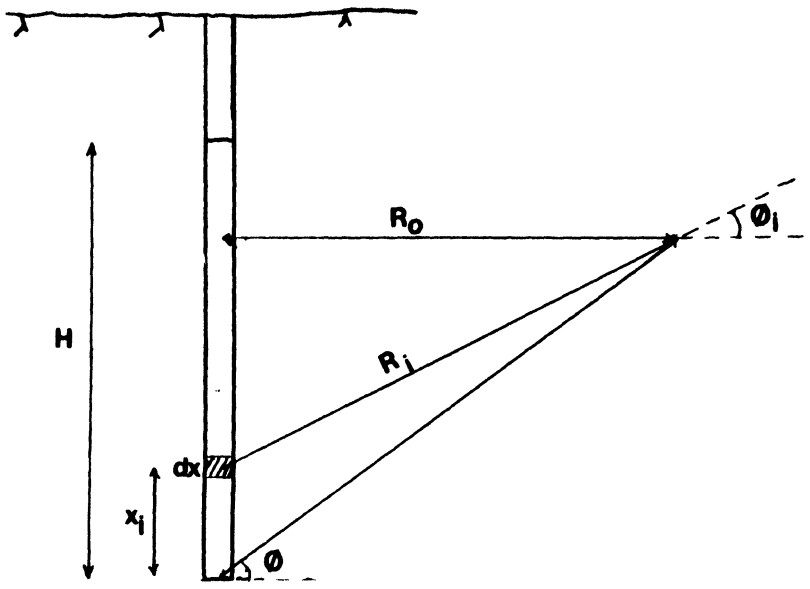
This paper describes the acceleration measurements which have taken place close to explosive charges. Charge concentrations from 0.2 - 75.0 kg per bore hole meter have been used in the experiments. The rock materials have been pegmatite, gneiss and granite with tensile strength of 5-15 MPa. A mathematical model describing peak particle velocity as a function of charge concentration, distance and explosive column length agree very well with the experimental velocities evaluated through integration of the acceleration measurements. Rock damage measurements indicate that cracks are induced or enlarged in the region where the peak particle velocity reaches 700-1000 mm/s. The mathematical model can together with the established damage criteria be used for predicting the damage zone of an arbitrary charge.

The contents of this report have been presented at the Rock Mechanics meeting in Stockholm February 21, 1978.

Känner vi till i vilken utsträckning som en bestämd sprängämnesladdning påverkar berget vid en sprängning kan vi eliminera eller åtminstone i stor utsträckning minska framtida problem genom en vettig planering av sprängningsförfarandet. Det kan gälla tunnlar och bergrum där stennedfall kan få ödesdigra och kostsamma konsekvenser vid drivningen eller under den kommande driftsperioden för anläggningen i fråga. Det kan gälla underjordsbrytning där hållfastheten i kvarstående pelare äventyras och det kan gälla slänter i vägskärningar och dagbrott där en dåligt planerad sprängning medför att en brant slänt ej kan bibehållas, med dålig totalekonomi som följd.

Vid sprängningen uppkommer genom den plötsliga expansionen en kraftig vibration vilken utbreder sig i den omgivande bergvolymen och ger upphov till en deformation vars storlek avtar med avståndet. Den genererade spänningen är för ett elastiskt material direkt proportionell mot densitet, svängningshastighet och vågrörelsens utbredningshastighet. I närområdet kommer töjningen att bli så stor att materialet brister och permanenta skador uppstår. Om de permanenta skadorna kommer att ha betydelse för den utsprängda bergkonturens bestånd eller ej beror på skadornas karaktär, tidsexponering, påverkan av grundvatten och inte minst de skadade planens orientering i förhållande till konturen och dess statiska belastning.

Vid SveDeFo har vi med hjälp av svängningshastigheten, vilken är ett mått på töjningen, försökt finna ett samband mellan sprängskador och laddningsgeometri. Den omgivande bergmassan kan naturligtvis innehålla ett flertal potentiella svaghetsplan som tål en mindre svängningshastighetsnivå än bergmaterialet i sig självt. Men när jag i fortsättningen talar om skadezon menar jag det område där uppsprickning i bergmaterialet förekommer.




Figur 1. Genom integrering över laddningslängden kan partikelhastigheten vid en godtycklig punkt beräknas.

By integrating over the charge length the particle velocity at an arbitrary observation-point can be calculated.

Genom att använda oss av ett empiriskt samband mellan laddningsvikt, svängningshastighet och avstånd som grundats på mätningar från relativt stora avstånd från sprängningar, kunde vi genom integration över en godtycklig laddningslängd beskriva svängningshastigheten som

$$v = k\, L^{\alpha} \left[ \int_0^H \frac{dx}{[R_o^2 + (R_o \tan\theta - x)^2]^{\beta/2\alpha}} \right]^{\alpha}$$

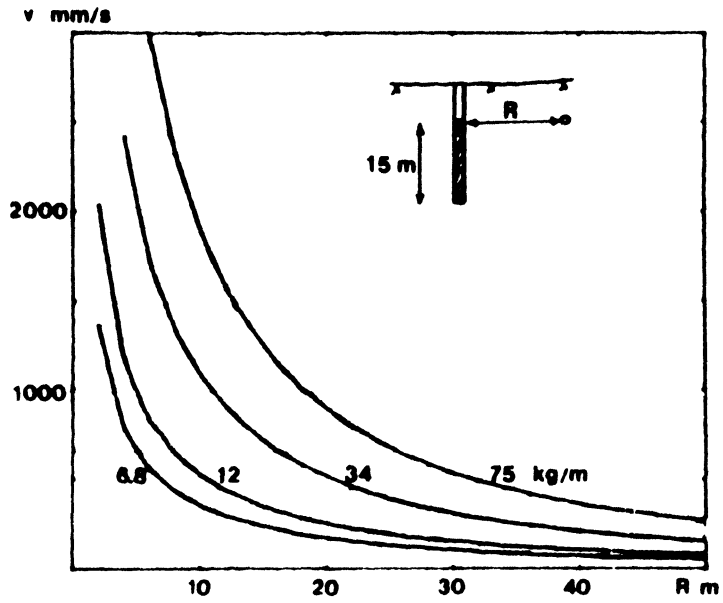
där

- v = svängningshastigheten i mm/s
- L = laddningskoncentration relativt ett referens-sprängämne (kg/m)
- H = laddningshöjd (m)
- $\theta$ = vinkel till observationspunkt
- $R_o$ = avstånd till observationspunkt (m)
- $\alpha$ = 0.7
- $\beta$ = 1.5
- k = 700

Ovanstående formel ger den fördelen att svängnings-hastigheter som genereras i närheten av en utsträckt

laddning kan beräknas. De tidigare använda empiriska formlerna gäller i första hand för stora avstånd där laddningarna uppfattas som koncentrerade.

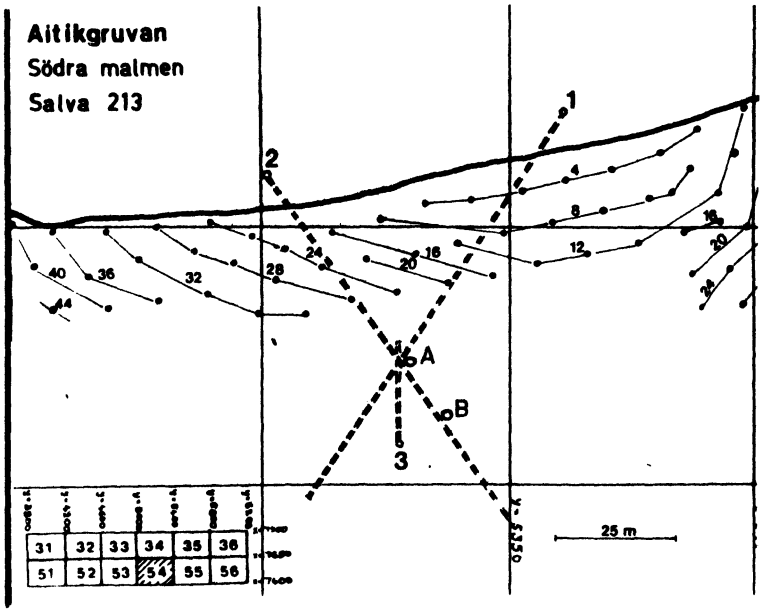
Figur 2 visar några beräkningar där ovanstående formel: använts.




Figur 2. Bilden visar en beräkning av svängnings-hastigheten för en 15 m lång laddning med varierande laddningskoncentrationer.

The curves represents the particle velocity as a function at the distance from a 15 m high explosive column with different charge concentrations per bore hole meter.

Inom projektet "Skonsam sprängning av slänter i dagbrott" som drevs tillsammans med bl.a. Aitik-gruvan och Boliden AB fick vi tillfälle att mäta svängnings-hastigheter och skadezoner vid sprängning av en produktionssalva i Aitik där 250 mm håldiameter användes.



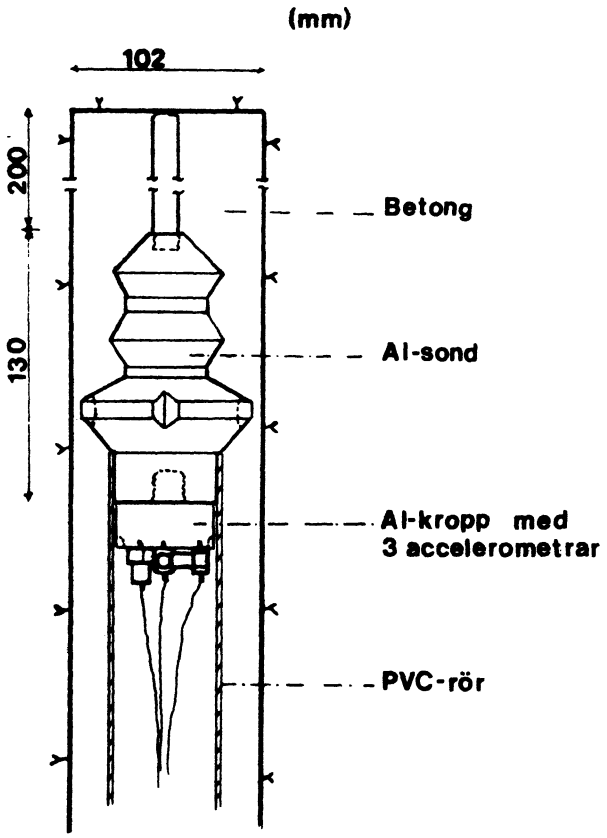

Figur 3. Diamantborrning utfördes före och efter en produktionssprängning för att fastställa skadezonen.

Diamond drilling was used in a production round before and after blasting to evaluate the damage zone.

Före sprängning diamantborrades 3 hål genom salvan och in i orört berg. Toron diamantborrningsutrustning användes och kärndiametern var 32 mm. Hålen krökningsmättes kontinuerligt för att följa upp hålavvikelsen. Hål nr 1 i figur 3 drevs 105 m och hål nr 2 90 m. De borrades horisontellt så att de skulle korsa de befintliga sprickstrykningarna vinkelrätt. Hål nr 3 borrades med 50° stupning så att foliationsriktningen skulle tvärås vinkelrätt. Efter sprängning urborrades kärnor parallellt med de tidigare hålen och en sprickfrekvensjämförelse gjordes. Bergarterna utgjordes huvudsakligen av gnejs och pegmatit med en draghållfasthet mellan 5-15 MPa.

Ökningen i antal sprickor var i närområdet, möjligen med undantag av de första två metrarna, en tvåfaktor större efter sprängning. Sprickfrekvensjämförelsen mellan kärnorna visade att vid 23 m är sannolikheten 50% för att vi har skador orsakade av sprängningen och vi har 5% sannolikhet att skadorna sträcker sig längre bak än 32 m.

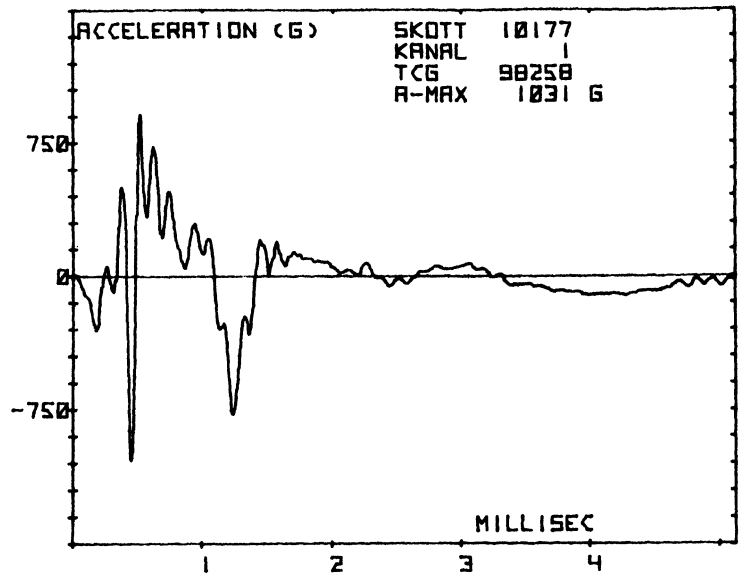
I samma salva utfördes mätning av de genererade accelerationerna. En aluminiumcylinder i vilken tre accelerometrar var monterade kunde med ett speciellt instrument nedföras i och fastskruvas i en tidigare fastgjuten aluminiumkropp.




Figur 4. Skiss av mätsond som används för accelerationsmätningar.

Sketch of probe used for the measurements of the acceleration.

Sonden i figur 4 användes för fastgjutning i ett uppåtriktat hål men tänker vi oss bilden upp-och-nervänd användes samma princip i Aitik. På aluminiumkroppen som gjuts fast sitter ett PVC-rör kring vilket betong även fylls. PVC-röret skyddar mot fukt och smuts. Genom röret kan sedan accelerometrarna införas och skruvas fast. Aluminium har genomgående använts i sonden eftersom metallen har ungefär samma akustiska impedans som berget.




Figur 5. Exempel på registrering av accelerationen.

Example of acceleration registration close to a detonating charge.

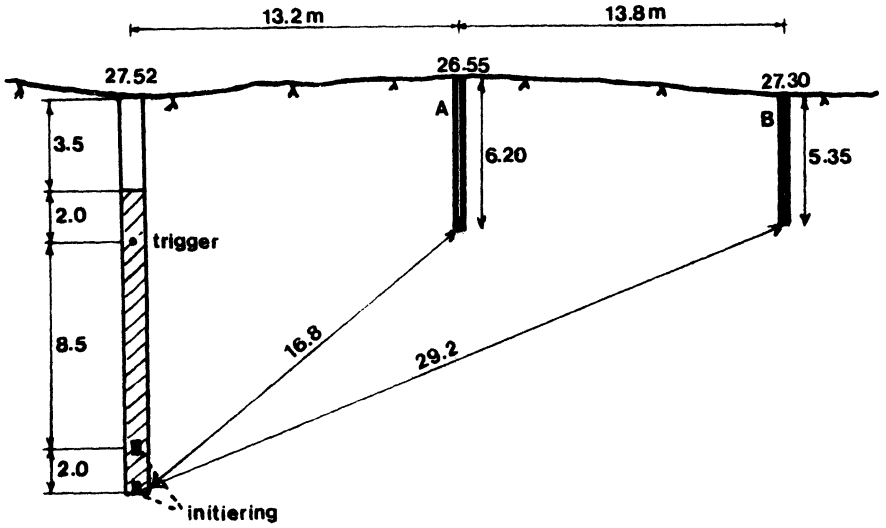
Via koaxialkabel och laddningsförstärkare bandades signalerna på en 14-kanalig FM-bandspelare av typ Sangamo Sabre III. Efter skott digitaliserades signalerna i en transient recorder och kunde numeriskt integreras för erhållande av svängningshastighet.

Accelerometrarna som användes är av fabrikat Brüel & Kjaer typ 4332, 4334 och 4368. Laddningsförstärkarna är av fabrikat Brüel & Kjaer typ 2626. Förbindelsen mellan laddningsförstärkare och accelerometer utgjordes av en "low noise" PVC-överdragen microdotkabel med kapacitansen 90 pF/m. Mellan laddningsförstärkare och bandspelare användes en koaxialkabel av typ RG59B/U med karaktäristisk impedans 75 ohm och kapacitansen 67 pF/m.

Tekniska data för FM-bandspelaren Sangamo Sabre III är:

| | |
|---|---|
| Bandhastighet | 1 7/8-120 inch per sec. |
| Frekvensområde | upp till 80 kHz beroende på bandhastighet. |
| Hastighetsavvikelse | $\pm$ 0,1 o/oo. |
| Svaj | 0,22% vid 120 ips, topp-topp. |
| Signalbrusförhållande | 50 DB vid 120 ips. |
| Inimpedans | 20 kΩ. |
| Utimpedans | < 10 Ω. |
| Stigtid | $6 \cdot 10^{-6}$ sek. |
| Overshoot | 2%. |
| Utnivån | Normalt 1 V rms för 40% swing linear phase filter. |

Två kanaler användes per givare för att erhålla två mätområden. Utvärderingen av resultaten har gjorts via en transientrecorder Nicolet 1090A Explorer och en bordsdator HP 9830.




Figur 6. Försöksgeometri vid mätning i närheten av produktionssalvan i Aitik. Laddningen utgjordes av 800 kg TNT-slurry.

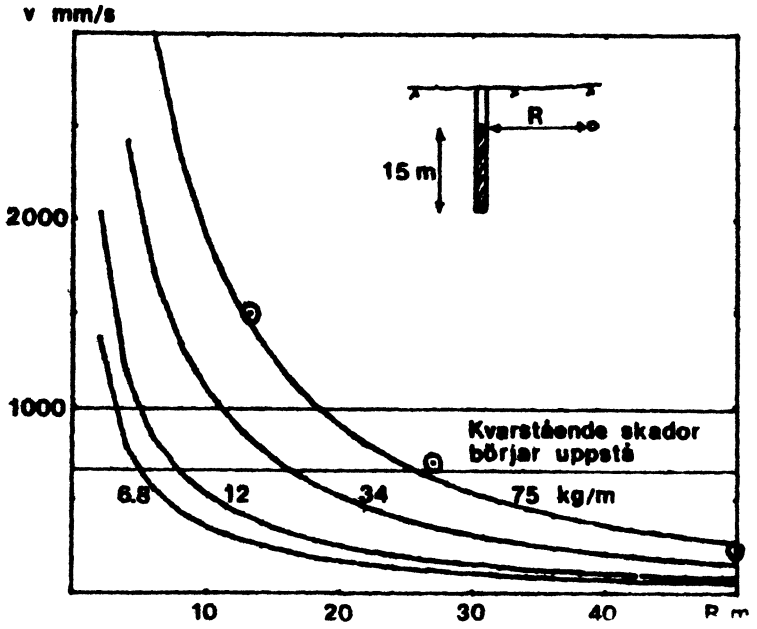
Experimental arrangement for acceleration measurements close to a hole loaded with 800 kg of TNT-slurry.

Eftersom flera intervall användes och enär ett flertal hål sprängdes i samma intervall nedsänktes en jonisationskontakt som skulle fungera som trigger (se figur 6). När detonationsvågen passerade triggern urladdades en kondensator och gav upphov till en puls vilken bandades på en av FM-bandspelarens kanaler. Med hjälp av denna indikation kunde vi vid resultatsutvärderingen enkelt tidsbestämma när det närmsta hålets slurrypelare initierats och när integreringen av den registrerade accelerationen skulle påbörjas.

De experimentellt bestämda svängningshastigheterna stämde förvånansvärt bra med de teoretiskt beräknade värdena. I figur 7 representerar de små cirklarna de experimentella värdena. De teoretiska värdena utgörs av laddningskoncentrationskurvan betecknad med 75 kg/m.

De horisontella linjerna vid 700 respektive 1000 mm/s i figur 7 täcker in den skadezon på ca 23 m som kunde konstateras via diamantborrningarna.

Enligt figur 7 har man relativt stora skadezoner för den laddningsgeometri som illusterats. D v s en 15 m lång laddning. Genom att dela upp laddningen och initiera de korta laddningarna var för sig är det naturligtvis möjligt att minska skadezonen med bibehållen laddningsdiameter.

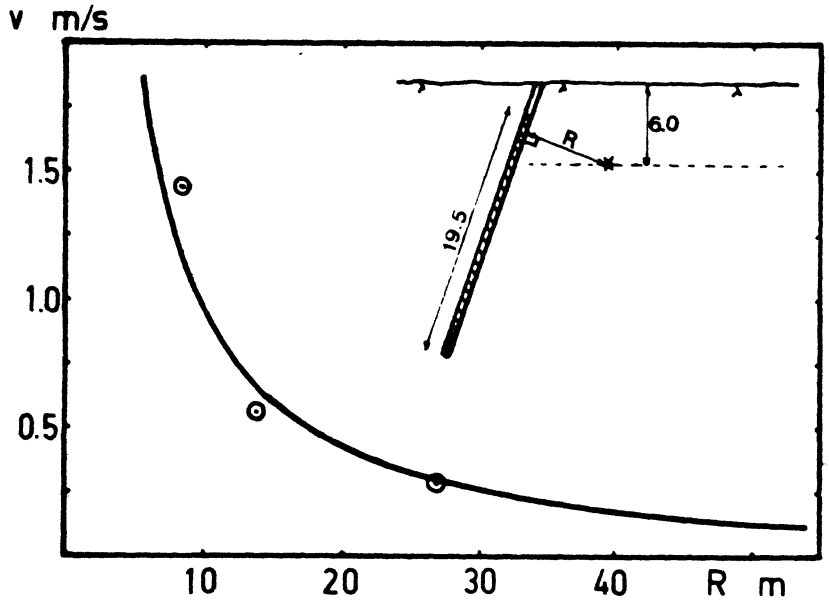



Figur 7. Diamantborrningarna och svängningshastighetsmätningarna indikerade att skador i berget uppstår vid 700-1000 mm/s.

Diamond core drillings and peak particle velocity measurements indicate that damage in the rock is established around 700-1000 mm/s.

I Aitik fick vi även tillfälle att utföra en mätning där laddningskoncentrationen 32 kg/m användes i 171 mm hål. En 19.5 m lång laddning användes och givarna var placerade på avstånden 8.5, 13.9 och 26.9 m.

Överensstämmelsen mellan experimentella och beräknade värden var, som framgår av figur 8, lika god i detta fall. Figur 8 visar att om sprickor uppstår vid 700-1000 mm/s skulle skadegränsen legat omkring 12 m från laddningen.

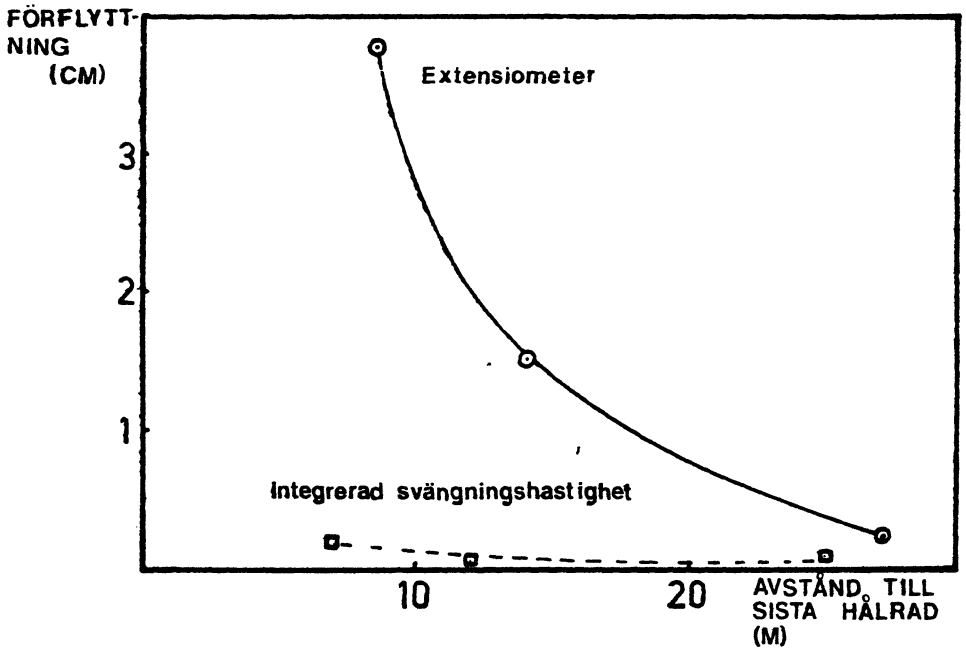



Figur 8. Experimentella och beräknade svängningshastighetsmätningar för en 19.5 m lång laddning med koncentration 32 kg/m.

Experimental and calculated particle velocities for a 19.5 m long charge with the concentration 32 kg/m.

Vid samma försök utförde Boliden en mätning av den kvarstående förskjutningen medelst 3 st 25 meters extensiometrar placerade mellan 8.5 - 27 meter bakom salvan med samma lutning som 171 mm hålen.

Resultatet från denna mätning visade på en kvarstående förskjutning av nästan 4 cm på 8 m avstånd från salvan. På 26 m avstånd var förskjutningen 3 mm.




Figur 9. Kvarstående förskjutning som uppmätts via extensiometer.

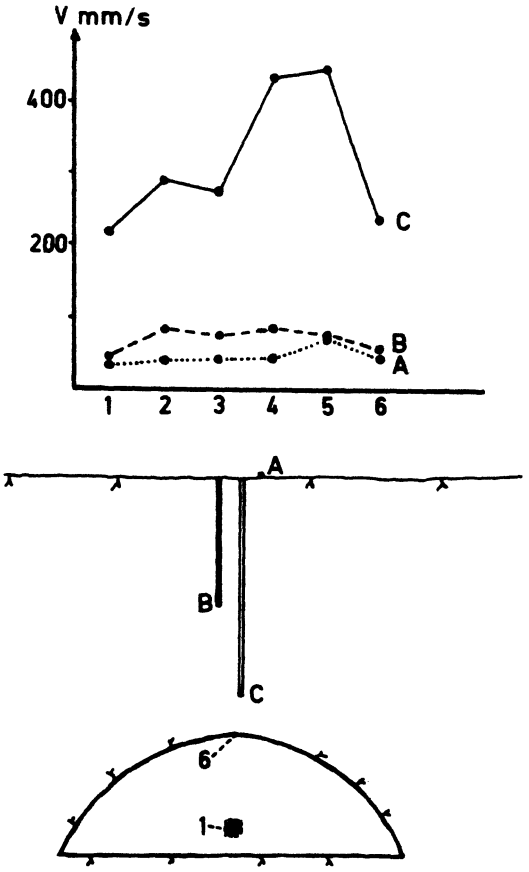
Residual deformations behind the round. 25 m extensiometers have been used for the measurements.

Genom att integrera de vertikala accelerationsmätningarna två gånger erhölls förflyttningar i de punkter 6 m under ytan där accelerometrarna var fastsatta. Dessa värden finns även inprickade i figur 9. Trots att två integreringar troligen ger ett mycket osäkert resultat av förflyttningen kan man konstatera att den fria ytan medfört att största kvarstående deformationer sker i berget närmast ytan.

Accelerationsmätningar har även utförts i närheten av klenare hål. Vid drivning av Västerleden i Göteborg fick vi inom ett projekt som Nitro Consult drev tillfälle att mäta vid tre olika avstånd från en tunnel (se figur 10). Från mätpunkt A till tunneln är avståndet 14 m och från C är det 2 m. Salvorna laddades med varierande sprängämnen i konturen så att olika grad av skadedjup skulle kunna studeras mellan de skilda tunnelsalvorna.

Det är intressant att notera från figur 10 att hålraden närmast periferiraden som laddats med ANFO ger större svängningshastigheter och således större skador än periferiraden vilken laddats med 17 mm Gurit.

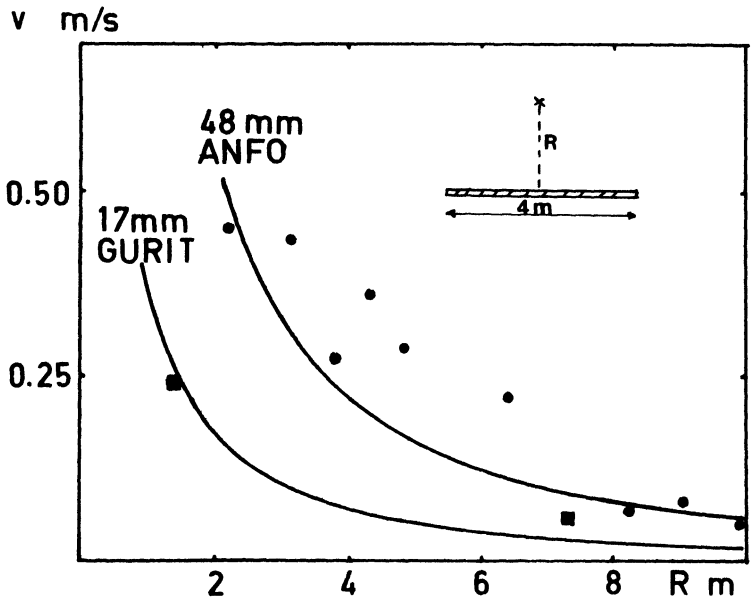
I diagrammet överst i figur 10 betecknar siffrorna 1-6 på x-axeln var hålen är placerade. Siffran 1 betecknar ett hål i kilen, siffran 6 betecknar ett hål i periferiraden och 2-5 står för hål i de mellanliggande raderna.




Figur 10. Svängningshastighetsmätningar i närheten av Västerledstunneln där 48 mm håldiameter användes.

Particle velocity measurements close to a road tunnel in Gothenburg where 48 mm hole diameter were used in the blasting operation.

Resultatet från tunnelmätningarna var tillfredsställande trots att vissa hål hade en betydligt större inspänning än vid pallsprängning.




Figur 11. Experimentella och beräknade svängningshastigheter för tunnelsprängning i Göteborg, Västerleden.

Experimental and calculated particle-velocities from the tunneldriving in Gothenburg.

För gnejs och graniter med likartade materialegenskaper har vi erhållit mycket god överensstämmelse mellan experimentella och beräknade svängningshastigheter. De skadezoner som inrapporterats från svenska och utländska källor stämmer också väl överens med de skadegränser vi erhåller för likartade laddningar om vi använder oss av skadekriteriet på 700 - 1000 mm/s. Detta gäller i hela registret från laddningskoncentrationer på 75 kg/meter ner till 0.2 kg/meter.

Jag tror att vi med dessa mätningar funnit ett bekvämt redskap för att kunna förutsäga skador i berg.

Det finns dock forfarande en mängd intressanta saker att undersöka som t.ex. inspänningens och den fria ytans inverkan, om en laddning med luftspalt ger mindre skador, jämförelse mellan svängningshastighet och dynamiska spänningsmätningar samt hur olika prestanda hos sprängämnet inverkar på sprickbildningen.

REFERENSER


1. D'Andrea, D.V., Fischer R.L. and Hendrickson — Crater Scaling in Granite for Small Charges.- Bu.Mines Rept. of Inv. 7409, 1970, 28 pp.

2. Olson, J.J., Willard, R.J., Fogelson, D.E. and Hjelmstad K.E. — Rock Damage from Small Charge Blasting in Granite.- Bu. Mines Rept. of Inv. 7751, 1973.

3. Siskind, D.E., Steckley, R.C. and Olson, J.J. — Fracturing in the Zone Around a Blasthole, White Pine, Mich.- Bu. Mines Rept. of Inv. 7753, 1973, 20 pp.

4. Siskind, D.E. and Fumanti, R.R. — Blast-produced Fractures in Lithonia Granite.- Bu. Mines Rept. of Inv. 7901, 1974, 38 pp.

5. Holmberg, Roger — Studiebesök vid några nordamerikanska gruvor.- SveDeFo, DS 1977:15, sid.37.

6. Sjöberg, Conny — Sprängteknisk konferens Karlskrona, 14 jan. 1972.

7. Holmberg, Roger och Krauland, Norbert — Undersökning av sprickfrekvens före och efter sprängning med 250 mm hål i Aitik.- SveDeFo, DS 1977:12

8. Stagg, Zienkiewicz — Rock Mechanics in Engineering Practice.- John Wiley & Sons, London (1968).

9. Vorobev, I.T., et al — Features of the Development and Propagation of the Rayleigh Surface Wave in the Dzhezkazgan Deposit.- Soviet Mining Science, vol. 8, nr. 6, pp. 634-639 (1972).

10. Langefors, U. och Kihlström, B. — The Modern Technique of Rock Blasting. - Almqvist & Wiksell, Stockholm (1967).

11. Lundborg, Nils — Markvibrationers beroende av laddning och avstånd. - (SveDeFo) Rapport DS 1977:2 (1977)

12. Holmberg, Roger — Sammanställning av ett antal markvibrationsmätningar.- (SveDeFo) Rapport DS 1977:9 (1977).

13. Nichols, H.R., Johnson, C.F. and Duvall, W.I. — Blasting Vibrations and their Effects on Structures.- (Bureau of Mines) Bulletin 656.

14. Starfield, A.M. and Pugliese, J.M. — Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges. A comparison between a computer model and field measurements. - Int. J.Rock Mech. Min. Sci., Vol.5, pp. 65-77, Pergamon Press (1968).

15. Persson, P.A. Holmberg, R. och Persson, G. — Skonsam sprängning av slänter i dagbrott.- BeFo Bergmekanikdag 1977. (SveDeFo) Rapport 1977:4.

16. Holmberg, R. och Krauland, N. — Undersökning av sprickfrekvens före och efter sprängning med 250 mm hål i Aitik.- (SveDeFo) Rapport DS 1977:12.

17. Byron, F. Murphey — Particle Motions near Explosions in Halite. - Journal of Geophysical Research, vol. 66, No.3, March, pp. 947-958 (1961).

18. Pazdanikov, N.V. — Calculating the stability of underground workings of the "Magnetite" mine against seismic blast waves. - Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh, No. 6, pp. 29-35, Nov-Dec (1974).

19. Mosinets, V.N., et al — Operational Method of Estimating the Seismic Effect of Blasting. - Fiziko-Tekhnicheseie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh, No. 4, pp. 38-41, July-Aug. (1971).

20. Holmberg, R. — Mätning av svängningshastigheten i närområdet till grov- och klenhålskransar vid skivrasbrytning i Malmberget. -(SveDeFo) Rapport DS 1978:3

21. Holmberg R, Nord, G. och Persson, P.A. — Bergskador vid kontursprängning. - (SveDeFo) Rapport DS 1978:2

22. Holmberg R., och Persson, P.A. — Markvibrationsmätningar vid sprängningars närområde i Boliden AB:s Aitikgruva. - (SveDeFo) Rapport DS 1978:1.

23. Holmberg, R. Persson, P.A. — The Swedish Approach to Contour Blasting. - Fourth Conference on Explosives and Blasting Technique. New Orleans, Louisiana, USA. Febr. 1-3, 1978.

24. Svanholm, B.O., Persson, P.A. and Larsson, B. — Smooth Blasting for Reliable Underground Openings. - Rockstore 77, Session 1, pp. 37-43. Sweden, September 5-8, 1977.

25. Lundborg, N. Holmberg, R. och Persson, P.A. — Markvibrationers avstånds- och laddningsberoende. - BFR-rapport R11:1978, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm (1978).