© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

MÄTNING AV DETONATIONSHASTIGHETEN I BORRHÅL OCH GASTRYCKET I SLÄNT I AITIK-GRUVAN

Shulin Nie, SveBeFo
Junhua Deng, SveBeFo
Per-Olof Sognfors, Boliden Mineral AB
Finn Ouchterlony, SveBeFo

Sammanfattning

Ett projekt med syfte att förbättra skonsam sprängning av slänter har drivits i Aitik-gruvan under 1993-94. Detta bidrag beskriver två nya mätmetoder som infördes under projektet för att kontrollera sprängningsprocessen.

Den första är den kontinuerliga mätningen av detonationshastigheten i hålen. Mätprincipen och mätningar från 46 hål i 10 sprängsalvor redovisas. Resultaten visade att sprängämnet Emulan 7500 höll en jämn och god kvalité under försöken. Dessutom kunde mätningarna användas till att kontrollera de verkliga tändföljderna i salvorna och till att identifiera källorna till markvibrationerna.

Den andra är mätningarna av gastrycket i slänten bakom konturraden, som syftade till att undersöka spränggasernas bidrag till sprängskadorna och till att bedöma en förspräckningssprickas effekt. Resultaten från 18 mätningar i 7 salvor visade att spränggaserna i vanliga salvor med spränghål utan förladdning sannolikt inte bidrar nämnvärt till skadorna. Vidare hindrade förspräckningssprickorna passagen av spränggaserna och de direkta stötvågorna. Däremot tryckte själva förspräckningen in gaser i slänten.

1. Inledning

Stabiliteten hos slänterna i Aitikdagbrottet är betydelsefull för gruvans ekonomi och arbetet med denna fråga pågår mer eller mindre ständigt. Under 1991 genomfördes ett projekt "Skonsam sprängning av slänter med grova hål" tillsammans av SveDeFo, Boliden Mineral och Nitro Nobel [1]. Trots projektets framgång verkade sprängskadorna på pallväggen fortfarande kunna minskas. Därför startades våren 1993 etapp 2 av projektet. Målsättningen var att minimera sprängskadorna på kvarstående pallvägg under beaktande av kraven på ekonomisk och praktisk produktion.

Ett omfattande mät- och uppföjlingsprogram ingick. Det bestod av följande tre steg: 1) noggrann dokumentation av borrning, laddning och uppkoppling av salvorna, 2) mätningar av detonationshastigheten (VOD) i hålen, trycket i luftfyllda borrhål (gastryck) bakom konturraden och markvibrationen under sprängningen och 3) mätningar av sprängningsresultat, t ex den vertikala hävningen i pallen.

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

En ingående utvärdering av försöken har rapporterats av Ouchterlony [2]. Detta bidrag beskriver enbart de två nya mätmetoder som infördes under projektet för att kontrollera sprängningsprocessen. De är den kontinuerliga mätningen av VOD i hålen och mätningen av gastrycket i slänterna under sprängningen.

2. Försöksuppläggning

Försöksuppläggningen framgår av Figur 1. Detaljerna beskrivs nedan.

Försöksområde: Försöksområdet låg på liggväggens mellersta och norra del, mellan Y 4385-4770 m på nivån 120-135 m. Hela sträckan är ca 400 m lång.

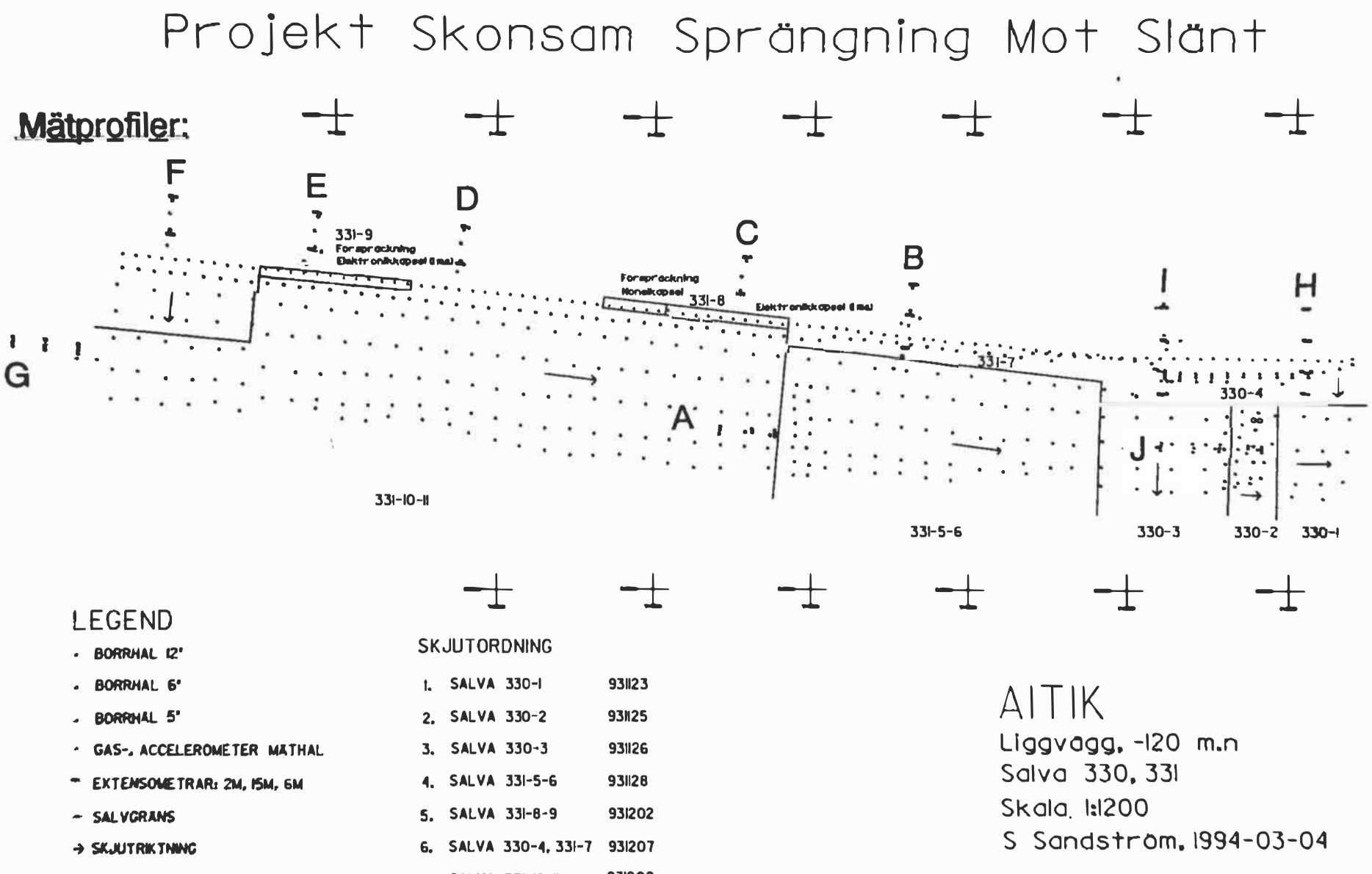
Försökssalvor: Totalt sköts 11 försökssalvor: salva 330-1, 330-2, 330-3, 330-4, 331-5, 331-6, 331-7, 331-8, 331-9, 331-10 och 331-11, se Figur 1. De är egentligen en uppdelning av två normala produktionssalvor, 330 och 331, för att kunna variera bl a inspändhet och skjutsriktning, se pilriktningar i Figur 1. Dessutom är salvorna 331-8 och 331-9 förspräckningssalvor där en spricka bildas men salvan står kvar.

Sprängplan: Borr- och laddplanen visas i Figur 2. Normala produktionshål (ϕ 311 mm) har försättningen 8 m och hålavståndet 10,5 m. Konturhålen (ϕ 140 mm) har försättningen 4,5 m och hålavståndet 4 m. Mellan produktionshål och konturhål borras en rad hjälparhål (ϕ 165 mm) som har försättningen 6 m och hålavståndet 5 m. Hålen laddas med Emulan 7500, en bulkemulsion från Nitro Nobels Gällivarefabrik. Ingen förladdning används. Alla hål initieras i botten och upptändningen sker med Nonel Unidet-systemet. Fördröjningen är 17 ms mellan hålen och 176 ms mellan raderna.

Mäthål: En sammanfattning av mäthålen för VOD- och gastrycksmätningarna redovisas i Tabell 1. VOD-mätningarna har utförts i 46 st hål av olika diametrar i 10 av de 11 försökssalvorna medan gastrycksmätningarna utförts i 7 av salvorna.

Tabell 1: Mäthålen för VOD- och gastrycksmätningarna.

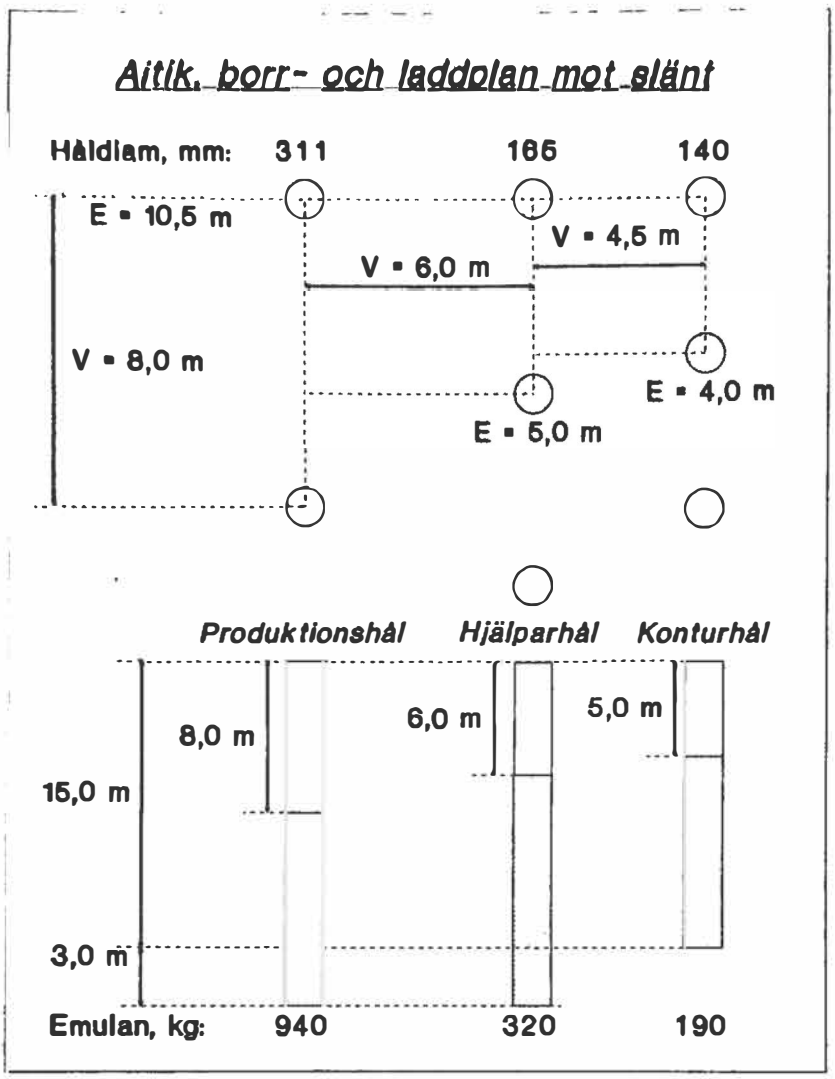
Salva nr	Antal VOD-mäthål			Gastryck mäthål		
	ϕ 311	ϕ 165	ϕ 140	Antal	Placering i mätprofil	Avstånd till salvans sista raden (m)
330-1	3	0	0	0	—	—
330-2	1	2	2	0	—	—
330-3	4	0	0	3	I	11,9~26,5
330-4	0	0	0	2	I	2,9~6,0
331-5+331-6	6	1	1	0	—	—
331-7	0	2	2	3	B	3,6~6,1
331-8	0	0	3	2	C	2,9~6,0
331-9	0	0	3	2	E	3,0~6,3
331-10+331-11	9	4	3	6	D, E, G, F	3,2~12,0



Figur 1: Försökssalvor och mätprofiler i Aitik-gruvan.

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 2: Borr- och laddplan för liggväggssalva mot slänt.

Mäthålen för gastrycksmätningarna utplacerades i olika mätprofiler bakom motsvarande salvor, se Figur 1. Mera detaljer om mäthålen för gastrycksmätningarna finns i avsnitt 4.1.

3. Mätning av detonationshastighet (VOD) i hålen

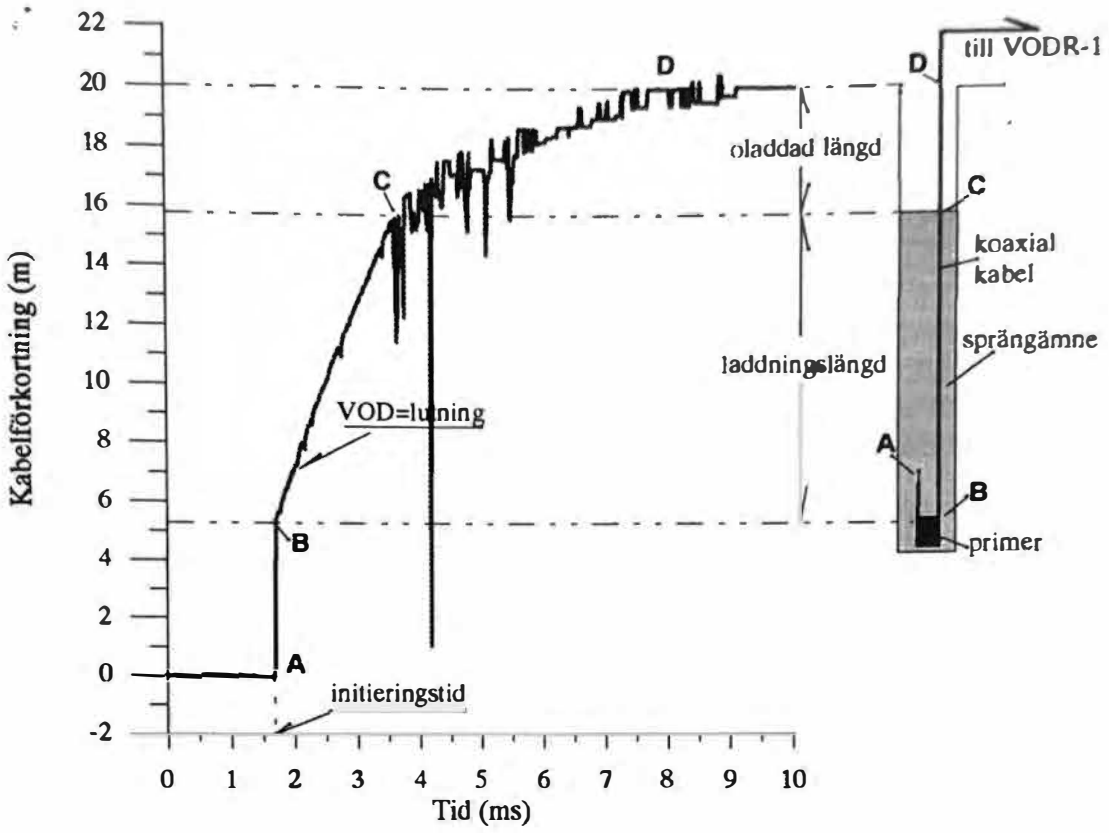
3.1 Mätprincip och utförande

VOD-mätningen bygger på pulsekometerprincipen [3]. Instrumentet som heter VODR-1 och tillverkades av EG&G i USA är det första i Sverige. Till instrumentet ansluter man en 50 Ω koaxial kabel som löper genom hela den laddning som skall mätas, se Figur 3. När laddningen detonerar och detonationsfronten närmar sig instrumentet, förkortas kabeln successivt av det höga trycket i fronten. Instrumentet mäter då förkortningen av kabeln som en funktion av tiden genom att

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

skicka ut pulser i kabeln, invänta reflektioner från kabeländan och registrera gångtiderna emellan dem. Pulserna skickas ut med 10 µs mellan rum. Därför är mätningen i praktiken kontinuerlig jämfört med tidigare metoder.

VODR-1 har två kanaler och kan mäta längs max 770 m kabel per kanal. Därför kan man mäta flera hål i serie. Under försöken, mätte vi upp till 8 hål per kanal.



Figur 3: En VODR-1 registrering från ett mäthål som visar kabelförkortning som en funktion av tid.

Figur 3 visar också en typisk signal från ett hål. VOD hos sprängämnet ges av lutningen på sträckan BC. Förutom de olika kabelförkortningshastigheterna i olika delar av hålet, finner man också den exakta initieringstiden av hålet samt den verkliga laddningslängden i hålet. Om man mäter VOD i flera hål i salvan, kan man kontrollera den verkliga tändföljden i en och samma mätning. Denna information kan tillsammans med tändplanen även användas till att identifiera källorna till markvibrationerna.

3.2 Resultat från VOD-mätningen

Mätinstrumentet VODR-1 fungerade utmärkt i fält och de uppmätta VOD-värdena kan sammanfattas i Tabell 2.

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tabell 2: Sammanfattning av detonationshastighetsvärdena.

Hål diameter (mm)	Antal mätvärden	VOD i hål (m/s)		
		botten	toppen	medelvärde
311	21	6200±300	5200±400	5700±300
140, 165	15	5600±300	4600±600	5100±400

Av totalt 46 st inmätta hål fås 44 st kabelförkortning-tidsregistreringar. Två registreringar uteblev för att kablarna klipptes av fordon och kunde inte ersättas. Av de 44 registreringarna erhölls 44 st exakta initieringstider men bara 36 st VOD-värden. Fyra st av de uteblivna VOD-värdena härrör från förspräckningssalvorna 331-8 och 331-9 där den korta fördröjningen om 1 ms mellan hålen inneburit samverkan emellan dem, t ex det andra mäthålet kunde ha initierats och krossat mätkabeln innan det första hade detonerat färdigt.

VOD-värdena uppvisade förväntade tendenser. Dels är VOD högre i hålbotten och avtar kontinuerligt mot toppen vid avladdningens början. Detta beror på primern och den högre densiteten hos sprängämnet där. Dels är VOD ca 10% högre i de grova produktionshålen. Däremot är skillnaderna mellan ϕ 165 mm och ϕ 140 mm värdena så små att de ofta drunknar i mätvärdesvariationerna som är ca 5-10%.

Detta visar att sprängämnet, Emulan 7500, hållit en jämn och god kvalité under försöket. Vidare kunde laddningslängden bedömas med acceptabel noggrannhet med VODR-1 instrumentet, men inte avladdningsdjupet.

Jämförelsen av de mäta initieringstiderna hos mäthålen med de planerade enligt tändplan visade mycket liten avvikelse. Detta avvikelse kan förklaras med inverkan av Nonelslangslängden, som är ju olika mellan olika hål. Nonelslangen brinner med ca 2000 m/s så varje meter slang motsvarar en halv ms extra fördröjning.

4. Mätning av gastryck i slänt

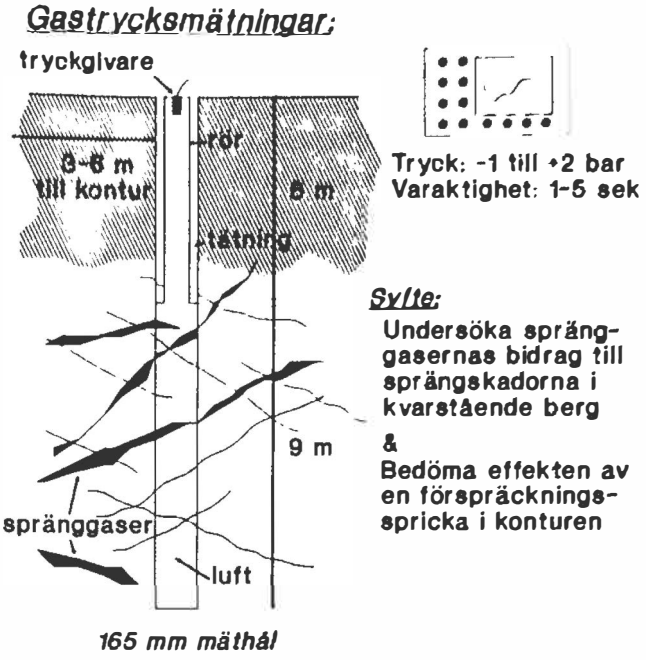
4.1 Mätprincip och utförande

Gastrycksmätningarna var helt nya. Idén kom från Dr McKenzie från Australien [4]. Principen är att man mäter tryckförändringen/tryckökningen i luftfyllt mäthål och bedömer spränggasernas intrång samt orsakade skador i berget. I vårt fall mätte vi också gastrycket bakom förspräckningssprickor med syftet att undersöka sprickornas effekt.

En tryckgivarenhet som består av en tryckgivare, en batteripaket och en utkrets byggdes upp för vårt ändamål. Enheten har ett mätområde 0-10 bar och motsvarande utspänningar 2-10 V. Lägg märke till två egenskaper hos enheten. Dels är utspänningen så hög som 0,8 V/bar och man kan därför undvika en hel del mättekniska problem som vi har erfarit tidigare [5]. Dels motsvaras nolltryck av en utspänning på 2 V istället för nollspänning. Detta utgör en extra kontroll av hela mätsystemet.

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Alla mäthålen var med ett undantag vertikala, 15 m djupa och hade diametern 165 mm. För att täta av resten av hålet från den sprängskadade övre delen, hade ett 6 m långt, ϕ 110 mm PVC-rör förts ner och gjutits fast med cement. Se Figur 4. I ovanändan av röret satt ett lock vari tryckgivaren monterats. Under sprängningen skyddades givaren av ytterligare ett lock.



Figur 4: Mäthål för gastrycksmätningar.

4.2 Resultat från gastrycksmätningarna

Gastrycksmätningar utfördes i 18 mäthål i de olika mätprofilerna, se Tabell 1 och Figur 1. Mätsystemet har fungerade mycket bra i fält och 17 st signaler erhölls. Ett kabelfel har inträffat ett mäthål och signalen därifrån förlorades.

Mätresultaten kan uppdelas i tre kategorier beroende på mäthålets placering: 1) gastryck från vanliga salvor, 2) gastryck från själva förspräckningsmomentet då sprickan bildas men salvan står kvar och 3) gastryck från vanlig salva men med en förspräckningsspricka mellan salvan och mäthålen. Resultaten kommer att presenteras i ovannämnd ordning.

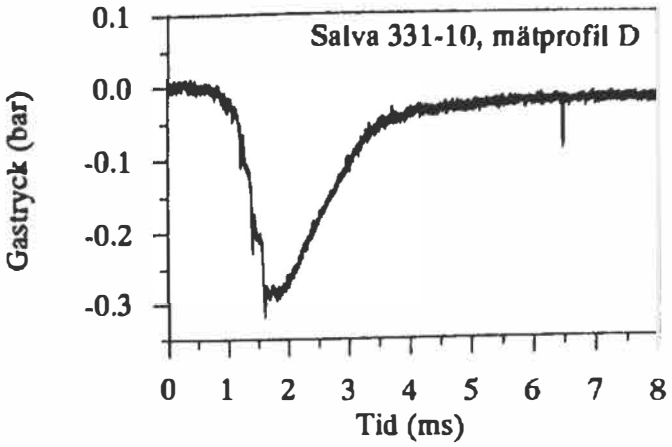
1: Gastryck från vanliga salvor

Hit tillhör 12 mäthål som gav 12 signaler. Våra mätningar visar att vanliga salvor enbart ger undertryck i mäthålen och att trycket normalt börjar komma innan det närmaste hålet detonerar. Vi hade väntat oss övertryck när inträngande språnggaser når mäthålen men från 10 av 12 mäthål ser signalen ut som Figur 5. De övriga två signalerna uppvisar mycket små tryckvariationer eller inga alls.

Den troligaste orsaken till undertrycket är den vertikala hävning som startas när stötvågen kommer och förstärks när vågen reflekteras mot pallens ovanyta. Hävningen öppnar sprickplan som står i förbindelse med mäthålet så att dess effektiva volym ökar och trycket sjunker när luften i mäthålet expanderar in i sprickorna.

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Undertrycket återställs när luft och eventuella sprängaser i berget strömmar in i mäthålet igen. Mätningarna utesluter alltså inte att spränggaser kan strömma in i mäthålen, men om de gör det är tryckeffekten ändå försumbar. Varaktigheten hos undertryckspulserna är mellan 1~5 s. Det största mätta undertrycket är ca 0,6 bar på 3~4 m avstånd bakom konturen, vilket ungefär motsvarar en fördubbling av mäthålets ursprungsvolym.



Figur 5: Lufttrycket i ett mäthål, mätprofil D, 5 m bakom ϕ 165 mm hjälparraden.

Hävningen, dvs den kvarstående vertikala lyftningen i pallen, sträcker sig ganska långt in i pallväggen. Om den antas bero på en irreversibel ökad sprickvolym som sprängningen skapat, så kan den relateras till de uppmätta gastrycken. Alla gastrycksmäthål hade ϕ 165 mm och var borrade till 15 m djup, utom ett. De hade 6 m djupa kragar av plast varför den aktiva borrhålslängden H ≈ 10 m. Vi kan då anta att hävningen h på 6 m:s djup är den ackumulerade spricköppningen över den aktiva längden.

Ytterligare förenklar vi alla sprickor som har förbindelse med mäthålen till cirkulära sprickor med diametern D. Antas vidare att luften i gastrycksmäthålen följer idealgaslagen när den expanderar isentropiskt, så kan det maximala undertrycket i mäthålen (P_{max}) uppskattas ur

$$P_{max} = [1+(D/\phi)^2 \cdot (h/H)]^{-1,4} - 1$$

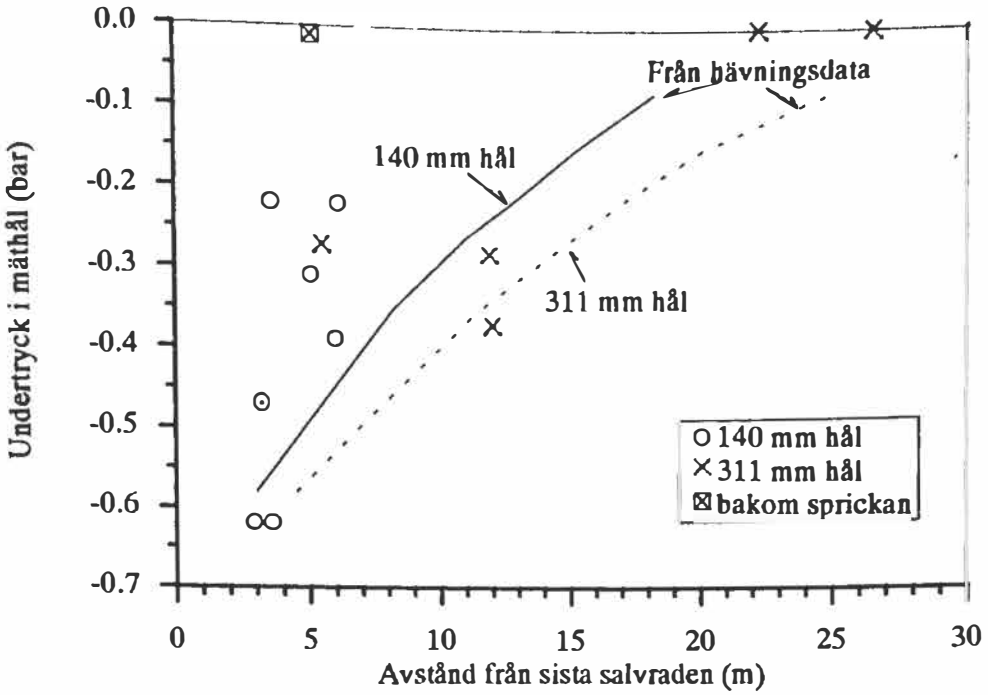
Rätt storleksordning för sprickors diametern D torde vara något större än medelavståndet mellan planen i en sprickfamilj, 0,9-1,7 m. Värdet D = 1,8 m ger följande beräknade undertryck i Tabell 3.

Tabell 3: Ur hävningen beräknade undertryck i mäthål [2].

Avstånd till 311 mm hål (m)	Avstånd till 140 mm hål (m)	Mätt hävning (mm)	Beräknat tryck (bar)
4,5	3,0	70	-0,58
7,1	5,0	50	-0,49
11,5	8,2	30	-0,35
15,1	11,0	20	-0,26
17,2	13,0	15	-0,21
20,1	15,2	10	-0,15
25,0	18,2	5	-0,08

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

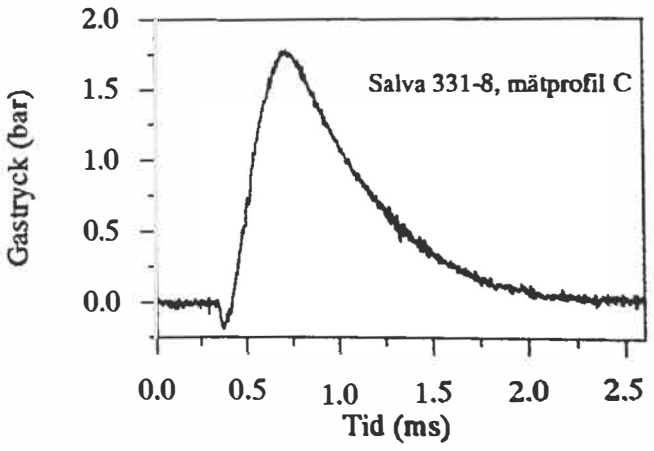
Beräknade undertryck som en funktion av avståndet från den sista salvraden har plottats i Figur 6 tillsammans med uppmätta gastryck. Då hävningsnivåkurvorna är maximalvärden så bör tryckkurvorna innesluta alla tryckdata. Det gör de nästan så överensstämmelsen är hygglig. Detta styrker hypotesen att undertrycket i gastrycksmäthålen främst orsakas av öppning av sprickplan i berget.



Figur 6: Maximala undertryck i mäthål vs avstånd från sista salvraden.

2: Gastryck från förspräckningssalvor

Hit tillhör 4 mäthål som gav 4 signaler. Under förspräckningsmomentet, salva 331-8 och 331-9, användes 2 mäthål var i profilerna C och E, ungefär 3 respektive 6 m från förspräckningsraden, se Figur 1. Tre av mäthålen gav märkbara tryck-signaler medan det fjärde gav försumbara sådana. Alla tre uppvisade samma beteende, efter en liten undertryckspuls i början (< 0,2 bar) så stiger trycket raskt till rätt höga positiva tryknivåer, se Figur 7.



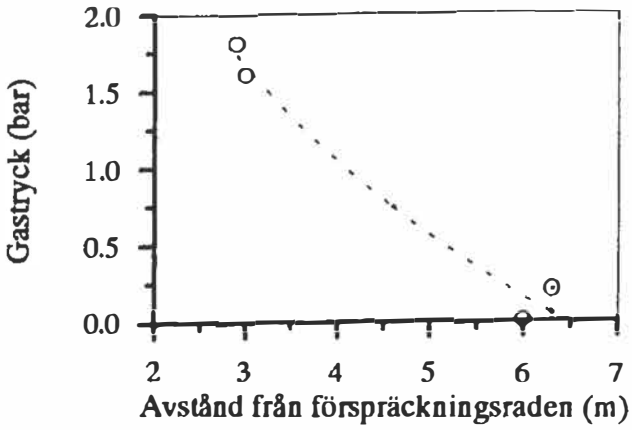
Figur 7: Lufttrycket i ett mäthål i mätprofil C, 2,9 m bakom förspräckningsraden.

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Den lilla undertrycksslängen orsakas av hävningen och det positiva trycket tyder på att spränggaser har pressats in i berget och mäthålet.

Som redovisas i Figur 8, är den positiva trycknivån 1,6~1,8 och 0~0,2 bar för avståndet 3 respektive 6 m från förspräckningsraden.

Det som skiljer förspräckningen från vanliga salvor är dels salvans inspändhet och dels att laddningarna i flera hål hinner samverka. Detta verkar alltså vara tillräckligt för att trycka in spränggaser i det kvarstående berget och eventuellt skada slänten.

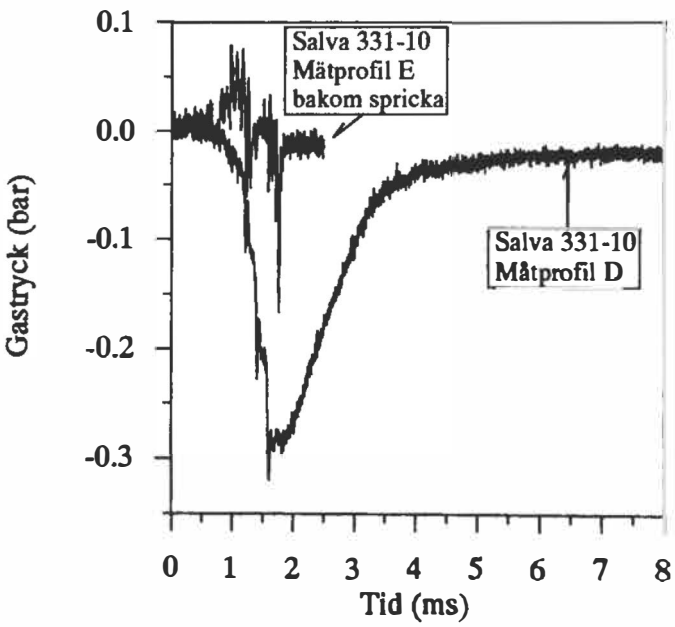


Figur 8: Gastryck från förspräckningssalvor.

3: Gastryck från vanlig salva men mätt bakom en förspräckningsspricka

Här har vi placerat två mäthål i profil E under salva 331-10 men fått bara en signal. I ena hålet fick vi tyvärr ett kabelfel. Det återstående hålet satt 1 m in i väggen eller ca 5 m från hjälparraden med ϕ 165 mm hål. Förspräckningssprickan från salva 331-9 låg mellan mäthålet och hjälparraden, se Figur 1.

Figur 9 visar att denna förspräckningsspricka effektivt hindrar stötvågen och spränggaserna att passera, jämfört med ett hål i mätprofilen D som sitter lika långt ifrån den sista detonerande hålraden men inte skyddas av någon förspräckningsspricka. Se också Figur 6 för jämförelse.



Figur 9: Lufttrycket i gastrycksmäthål med (i mätprofil E) eller utan (i mätprofil D) förspräckningsspricka framför.

© 1995 Svenska Bergteknikföreningen och författare

5. Slutsatser

På grundval av mätningarna har följande slutsatser kunnat dras:

- Detonationshastighet och gastryck är relativt enkla att mäta men ändå ger goda resultat. VOD-mätning är dessutom ett utmärkt sätt att kontrollera den verkliga tändföljden och laddningslängden i sprängsalva.

- Under försökens gång fungerade Unidet-upptändningen bra och det använda sprängämnet, Emulan 7500, höll en jämn och god kvalité.

- I vanliga sprängsalvor trycker laddningarna inte in nämnvärda mängder spränggaser i berget och nivån på mätta undertryck visar en hyfsad korrelation med uppmätta hävningar.

- En förspräckningsspricka hindrar stötvåg och spränggaser att passera men själva förspräckningen trycker in spränggaser i berget.

- Stötvågen från detonerande laddningar startar en dynamisk hävningsrörelse i berget som öppnar sprickplan och leder till tryckfall i gastrycksmäthålen.

- Trots de inspända förhållandena i normala Aitiksalvor har spränggaserna sannolikt kunnat avföras som en direkt källa till sprängskador bakom slutkonturen. Detta utesluter dock inte att spränggaserna kan ge betydande bidrag till sprängskadorna om t ex hålen förladdas så att gasernas ventilation hindras.

Referenser

[1] Sognfors P O. Skonsam sprängning mot slutlig slänt i Aitik-gruvan. Föredrag nr 13, Sprängteknisk konferens, 8-10 februari 1993, Nitro Nobel AB.

[2] Ouchterlony F. Uppföljning av stora sprängsalvors funktion genom kontinuerlig mätning av detonationshastighet, vibrationer och gastryck. Sprängteknisk konferens, 18-20 januari 1995, Nitro Nobel AB.

[3] Chiappetta R F och Pressley J R. Portable, Multi-channel and Continuous Velocity of Detonation Recorders. Fourth High-Tech Seminar, 20-25 Juni 1992, Nashville, Tennessee, USA.

[4] LeJuge G E, Jubber L, Sandy D A och McKenzie C K. Blast Damage Mechanisms in Open Cut Mining. Art till 4th Int Symp on Rock Fragmentation by Blasting, Wien, juli 1993.

[5] Nie S, Persson A, Deng J och Nyberg U. Measuring Dynamic Pressure in ANFO and Emulsion Explosives - Experiences in Developing a Pressure Gauge Based on Piezo Ceramic Material. SveDeFo rapport DS 1990:1, 1990.