© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

FRAGMENTERINGSUPPFÖLJNING - MRICA

Finn Ouchterlony, Bengt Niklasson och Sten Abrahamsson,
Stiftelsen Svensk Detonikforskning, SveDeFo, Stockholm

Sammanfattning

Vid en uppföljning av 12 produktionssalvor i ett sidotag i Mrica-projektet på Java befanns förekomsten av tätt liggande porösa band styra styckefallet så mycket att medelstyckefallet k_{50} var i det närmaste oberoende av specifik laddning inom området 0.30-0.56 kg/m³. Detta oberoende resulterade i sänkning av de rörliga kostnaderna för borrning och sprängning med 20 - 40%.

Fragmenteringsuppföljningen har varit till stor praktisk nytta och gett värdefulla insikter i komplicerade sammanhang, trots att resultaten inte direkt kan användas för att kontrollera fragmenteringsprognoser.

1. Projektbeskrivning

SveDeFo har utfört en fragmenteringsuppföljning av 12 produktionssalvor vid Mrica på ön Java i Indonesien. Vid Mrica bygger SABCON konsortiet, i vilket bl a Skanska AB, ASEA och det engelska företaget Balfour Beatty ingår, en kraft- och bevattningsdamm över Serayufloden med tillhörande kraftstation.

Till dammanläggningen kommer innan allt är klart 3 - 4 miljoner m³ berg att ha tagits ut från ett sidotag i Tampomas på 11 km avstånd från dammen. Sprängningsarbetena där påbörjades i januari 1985 och beräknas vara avslutade i mars 1988.

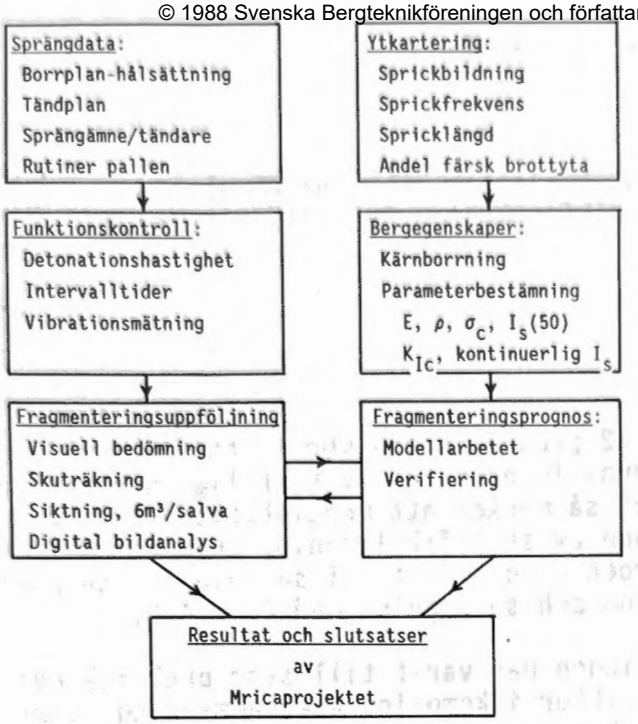
SveDeFo:s långsiktiga forskningsprogram, vilket stöds av Skanska m fl företag, har som ett delmål att kunna göra fragmenteringsprognoser för sprängning på grundval sprängdata, sönderbrytningsgeometrin, bergstrukturen och det intakta bergets egenskaper.

Sidotaget i Tampomas bedömdes vara en lämplig försöksplats för en studie av sambandet mellan fragmenteringen och dels den specifika laddningen, dels bergets struktur och hållfasthet, för att ha som grundval för prognosarbetet. Denna studie har drivits i samarbete med Skanska, som bekostat transport av forskare och utrustning till Mrica samt inkvartering och kringarbeten på plats.

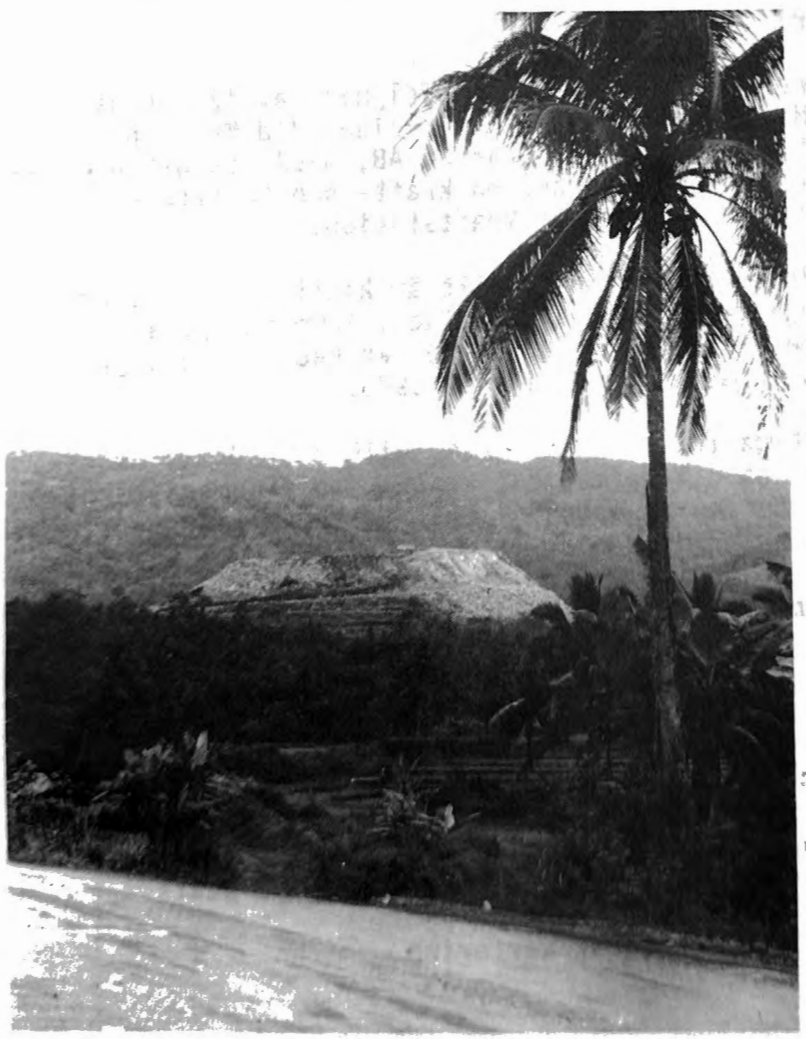
I figur 1 visas en flödesplan för projektet. Under okt.-nov. 1986 utförde två SveDeFo-medarbetare följande arbeten på plats:

- Övergripande strukturgeologisk kartering
- Kärnborrning

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 1: Flödesplan för Mricaprojektet.



Figur 2: Tampomasberget i oktober 1986 när ca 100 m av toppen sprängts bort.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

- Sprängdatainsamling
- Mätningar för att kontrollera sprängämnets funktion
- Insamling av styckefallsdata
- Kartering av pallkanter före och efter sprängning för bedömning av sprängskador och borrhålsavvikelser.

Under 1987 har grundmaterialet bearbetats och fullföljts med digital analys av fragmenteringsbilder, laboratorieprovning av borrkärnematerial samt en sammanställning och analys av resultaten. En detaljerad redovisning av arbetet ges i SveDeFo rapport DS 1987:6 /1/.

2. Berget i Tampomas

Sidotaget i Tampomas var ursprungligen resterna av en vulkankärna som reste sig ca 150 m över en omgivning bestående av vulkaniska vittringsjordar, se figur 2. Dess mått vid basen var 400 • 250 m med brant stupande flanker, ca 50 - 60° eller mer.

Berget består huvudsakligen av en kompetent andesit med en porositet på ett par procent. Den genomsätts av såväl tunna porösa band, se vidare nedan, som större områden med en lokal porositet på upp till 20%. Tätheten låg normalt inom 2.400 - 2.500 kg/m^3. Bergets E-modul har uppmätts till 25 - 40 GPa, dess Poissontal till 0.15 - 0.25 samt ljudhastigheterna till 3.400 - 4.600 m/s (P-våg) och 2.200 - 2.700 m/s (S-våg). De porösa områdena uppvisar genomgående lägre värden än de intakta.

Uppmätta hållfasthetsdata visar samma tendens. Punktlaststyrkeindex för det intakta berget var typiskt 5 - 7 MPa och 20% lägre för de porösa delarna, motsvarande draghållfasthetsvärden är 8.1 resp. 7.4 MPa och brottseghetsvärdena 1.68 resp. 1.26 MN/m$^{1.5}$. De porösa banden, som en oerfaren person knappast ser, utgör alltså intakta svaghetsplan i den omgivande andesiten.

Den horisontella linjekarteringen av bergytan visade att det fanns 4 oberoende spricksystem i Tampomas. Sidotagets norra och södra delar har likartad struktur då en vridning av den södra delens sprickor 15 - 40° västvart ger god överensstämmelse med systemen i den norra delen.

Medelvärdena för uppmätta sprickavstånd ligger inom 0.4 - 4.7 m, för spricklängderna inom 2 - 7 m. Mätvärdena har analyserats och mätfelen befunnits vara acceptabla. De följer som väntat exponential- och lognormalfördelningar.

En sprickfamilj är nästan horisontell och den specialkarterades med vertikala linjer. Då upptäcktes en nästan horisontell struktur i berget. Ibland syntes en färgbandning, ibland ingenting. Nära kvarstående borrpipor kunde banden vara uppspruckna. En diamantsågad yta visade sedan att banden bestod av porösare berg.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Testning av borrkärnematerialet stödde denna observation genom korrelationen med den lägre hållfastheten och genom att en fuktad borrkärnas yta torkar fortare där den är porös, se figur 3. Tjockleken hos banden är typisk 2 - 10 mm och medelavståndet 100 - 200 mm. Uppspräckta porösa band utgör huvuddelen av det horisontella spricksystemet, se figur 4.

Bergmassans egenskaper bedömdes både enligt Bartons Q-system /2/ och enligt Bieniawskis RMR-system /3/. Med Q-värden på 8 - 11 och RMR-värden på 87 - 92 är berget bra till mycket bra. Den södra delen av sidotaget hade något bättre berg eftersom blockstorleken där var 2 - 4 gånger större än i den norra delen, i genomsnitt 4.6 m^3 mot 1.1 m^3 om de uppspruckna porösa banden räknas in. Bergets relativa sprickfrihet visas bl a av att blockens horisontella snittyta i den södra delen i medeltal var 5.8 m^2 mot 2.7 m^2 i den norra delen.

3. Borrning och sprängning

Vid tidpunkten för fragmenteringsuppföljningen låg berguttaget på 310 - 320 m nivån, dvs cirka 50 m över omgivande landskap. I norra delen av sidotaget, på 310 m:s nivå, bröts en 10 m pall och i den södra delen, på 320 m:s nivå, bröts en 15 m pall. Se figur 5.

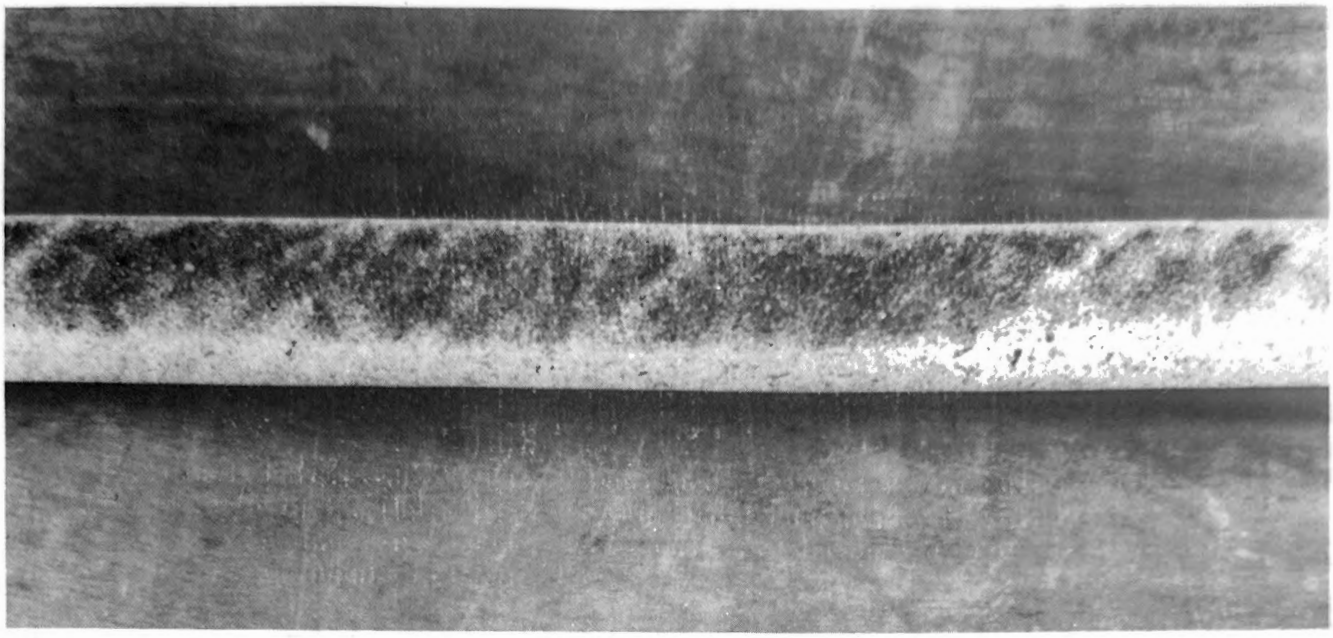
Borrningen gjordes i tvåskift med ROC 712H borraggregat och COP 1036 borrmaskiner försedda med Ø 76 mm stiftkronor. Laddningsarbetet utfördes på dagskift. Borrning, laddning och sprängning inklusive skutsprängning utfördes av ca 40 man.

Tabell 1 redovisar de typiska borrnings- och sprängningsförhållandena som rådde i Tampomas. Borrplanen hade alternerande hålsättning, en försättning på 2.5 m och hålavstånd på 3.0 m. Tändplanen hade en flack V-öppning. Avståndet mellan kvarstående hålpipor i pallfronten gav en uppfattning om borrhålsavvikelserna. Ansättningsfelet mättes på pallhyllan. Avvikelserna från planerad hålsättning var helt slumpmässiga med en spridning på ca 20 cm.

Tändplaner och laddningsdata noterades på plats i samarbete med laddarbetarna och stämdes av mot sprängsalverapporter och den rapporterade dagliga sprängämnesförbrukningen. Varje vecka sköts 2 - 3 salvor om mellan 3-8000 m^3 berg och 50 - 100 m^3 berg/hål. En typisk rapport visas i figur 6.

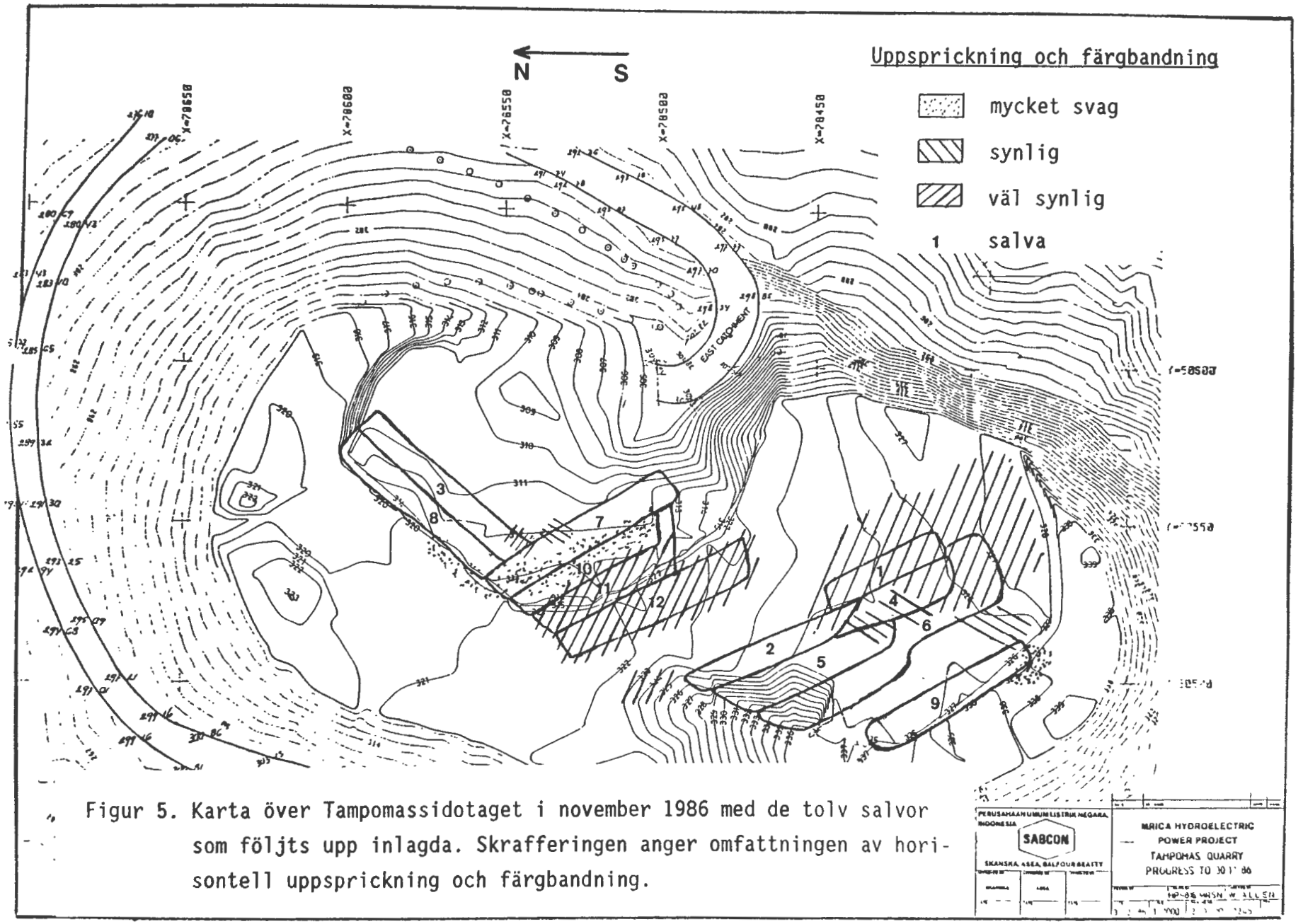
Vädret i Tampomas var mycket varierande, under eftermiddagen regnade det ofta kraftigt. Under sådana förhållanden laddades hålen med Gelignite HE, en dynamit från ICI/Atlas Taiwan Corp. Under torrare förhållanden användes ANFO med Premix i pipdelen, se figur 7. Gelignitehålen hade samma bottenladdning som ANFO-hålen medan pipdelen bestod av Ø 55 mm Gelignitepatroner. Upptändningen gjordes med 2 Nonel ms sprängkapslar i varje hål.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 3: Fuktad Ø 42 mm borrkärna av Tampomasandesit som torkat i de porösa banden.

Figur 4: Tampomasberget på nivån 325-340 m. Observera de nästan horisontella sprickorna i pallfronten, vilka huvudsakligen är sprängskador.



Figur 5. Karta över Tampomassidotaget i november 1986 med de tolv salvor som följts upp inlagda. Skrafferingen anger omfattningen av horisontell uppsprickning och färgbandning.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tabell 1: Typiska borr- och sprängdata för Tampomassidotaget innan fragmenteringsuppföljningen började.

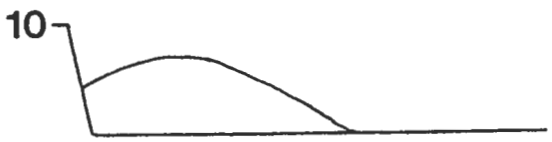
Pall geometri	
Pallhöjd	10 eller 15 m
Pallbredd	40 - 70 m
Palldjup	8 - 10 m
Hålrader	4
Håldiameter	76 mm
Hållutning	vertikal
Försättning	2.5 m, alternerande
Hålavstånd	3.0 m
Sprängämne (torrt väder):	
10 m pall	10 kg Gelignite HE
	24 kg ANFO eller Hydranex
15 m pall	15 kg Gelignite HE
	37 kg ANFO eller Hydranex
Sprängämne (regnigt väder):	
10 m pall	30 kg Gelignite HE
15 m pall	46 kg Gelignite HE
Förladdning:	
10 m pall	1.5 m borrkax
15 m pall	2.0 m borrkax
Specifik laddning:	0.4 - 0.5 kg/m³

Upptändning:

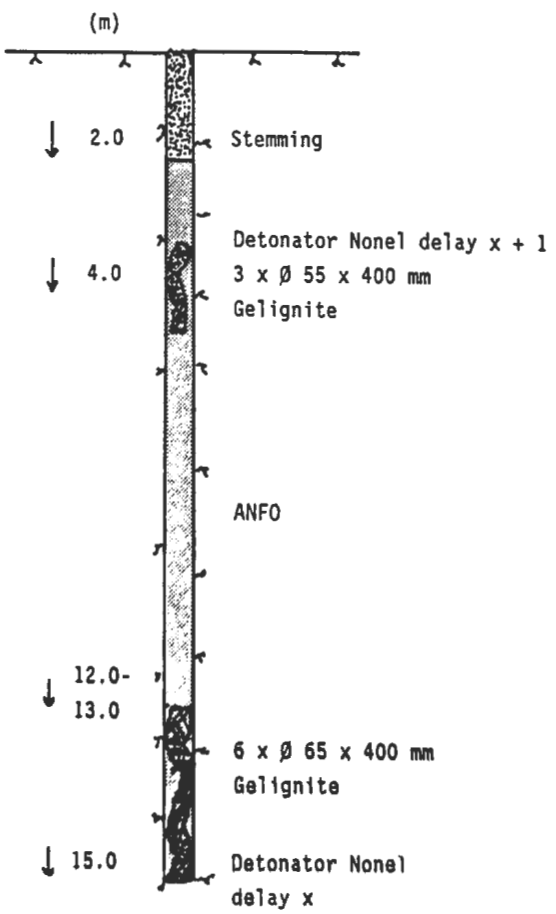
2 NONEL ms. sprängkapslar, en i botten och en i pipan.
Pentylstubin (5g/m) på ytan, stubinupptändning.
Tändföljd, flack V-öppning.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

BLAST NO.		: 11
DATE		: 861126
NAME		: The Loop
AREA		: North
LEVEL	M	: 320-310
COORDINATE REF.		: 78480 , 50530
BLAST DIRECTION		: NNE
HOLE DIAMETER	M	: 0.076
HOLE DEPTH	M	: 10.5
HOLE ANGLE		: 70
TOTAL DRILL LENGTH	M	: 410
NUMBER OF HOLES		: 39
STEMMING	M	: 1.5
BURDEN	M	: 2.5
SPACING	M	: 3.5
TOTAL CHARGE/HOLE	Kg	: 30
CHARGE BOTTOM	Kg	: 9 Gelegnite 65
CHARGE COLUMN	Kg	: 21 Gelegnite 55 or Hydranex
ROCK VOLUME/HOLE	M3	: 76
TOTAL VOLUME	M3	: 2973
TYPE OF INITIATION		: Nonel*2, flat V
SPEC.CHARGE	Kg/M3	: 0.39
BOULDERS WEIGHT %		: < 0.5
FRAGMENTATION RES.		: Fine. Even. No blocks. Good throw.
BACK BREAK		: < 1.0
UNDETONATED HOLES		: -
FILM NO.		: 14, 15
SIEVING K50	mm	: 205
WEATHER CONDITION		: Fine
MUCK PILE PROFILE		:



Figur 6: Rapport från salva nr 11.



Figur 7: Typiskt ANFO-hål i 15 m pall.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

En sammanfattning av borr och sprängdata för de 12 salvor som följdes upp i Tampomas visas i tabell 2. Alla salvor sköts med V-öppning utom salva 6 som sköts radvis. Andelen ANFO i salvorna varierar mellan 0 och 72% då i allmänhet både ANFO/Gelignite-hål och rena Gelignite-hål ingick i varje salva. En uppskattning av sprängstyrkan gjordes därför för de två håltyperna.

Gelignitens viktstyrka är uppskattningsvis 10 - 15% högre än ANFO:ns. En Ø 76 mm ANFO laddning håller ca 3.7 kg/m medan en pipladdning med Ø 55 mm Gelignite håller ca 3.3 kg/m, vilket ger samma sprängstyrka. Bottenladdningen bestod i båda fallen av 6 st Ø 65 mm x 400 mm Gelignite-patroner, vilket ger ca 4.5 kg/m och avsevärt högre sprängämneskoncentration. Med tanke på att Gelignite är frikopplad så att spränggasernas tryck-tidförlopp blir mer utdraget och mer likt ANFO:ns, så bedömdes de två håltyperna vara i stort sett likvärdiga ur sprängstyrkesynpunkt.

Bottenladdningen var lika stor i båda pallarna och förladdningsdelen något mindre i 10 m pallarna, se tabell 1. De båda effekterna motverkar varandra och hålen i 10 m och 15 m pallarna är alltså ungefär lika kraftigt laddade.

I syfte att kontrollera sprängsalvans funktion mättes såväl detonationshastigheter som primerfunktion i några borrhål. Avsikten var ursprungligen också att mäta svängningshastigheten i berget nära salvan för att kunna relatera amplituden till skadebilden och intervallen till tändplanen. Det senare gick inte att göra då avståndet till fast klyft, 50 - 60 m, och bergets höga inre dämpning gav för låga signalnivåer i medtagen mätutrustning.

Detonationshastighetsmätningar gjordes för ren ANFO, för ANFO med Premix och för Gelignite. Uppmätta hastigheter var 3.500, 3.500 respektive 5.500 m/s. Gelignite-värdet skall jämföras med det av tillverkaren uppgivna 5.200 m/s. Ett särskilt prov visade att det räckte med en 260 g Gelignite-primer, 1/5 patron, i hålbotten för att initiera ANFO:n som redan efter 0.4 m detonerade med full hastighet.

Sprängskadorna i kvarstående berg bedömdes både visuellt och med kärnborrning enligt Mäki /4/. Resultaten visar att berget spräckts upp ned till 1 á 2 m under pallytan. Tillhörande sprickor i pallfronten stupade nästan lodrätt och parallellt med existerande spricksystem, vars sprickor ibland vidgats permanent. Åtskilliga av de horisontella sprickorna på pallfronten, särskilt de nära kvarstående borrhålspipor, bedömdes även vara sprängskador, se figur 4 och 5. Bakåtbrytningens storlek mättes också.

Av de 12 uppföljda salvorna i Tampomas sköts 6 i sidotagets norra del (10 m pall) och 6 i den södra (15 m pall). Skjutriktningen var NO, utom för pall 3 och 8 i norra delen som sköts mot SO. Då styckefallet var i finaste laget för dammen kunde under uppföljningens gång försättning och hålavstånd utökas från 2.5 • 3.0 m till 3.0 • 3.5 m samtidigt som hålen i några salvor med olika hålsättning borrades 70° i stället för vertikalt.

Tabell 2: Sammanställning av borr- och sprängdata samt strukturdata.

Salva nr[1]	Specifik laddn. (kg/m³)	Medelstyckefall sikt/foto (mm)/(mm)	Försättn. hålavstånd (m)·(m)	Pall höjd[2] (m)	Sprick-frekv. (1/m)	Porösa band[3]	Specifik borrning (m/m³)	Hål-lutn. (°)	Andel ANFO[4] (%)	Skjut-riktn.	Skut-andel (%)
1-S	0.49	- /170	2.5·3.0	15	0.72	++	0.135	90	72	NE	2.0
2-S	0.51	- /170	2.5·3.0	15	0.64	++	0.141	90	69	NE	>2.0
3-N	0.56	- /175	2.5·3.0	10	1.24	+	0.180	90	58	SE	<0.5
4-S	0.49	100/125	2.5·3.0	15	0.82	++	0.139	90	71	NE	1.0
5-S	0.52	- / 65	2.5·3.0	15	0.76	0	0.147	90	41	NE	1.5
6-S	0.42	310/125	2.5·3.0	15	0.72	0	0.138	90	15	NE	3.0
7-N	0.30	265/190	2.5·3.5	10	1.00	+	0.113	90	0	NE	1.0
8-N	0.35	325/155	2.5·3.5	10	1.17	+	0.137	90	20	SE	<0.5
9-S	0.36	- /150	2.5·3.5	15	0.51	0	0.132	90	0	NE	4.0
10-N	0.48	165/195	2.4·3.0	10	0.96	+	0.146	70	32	NE	<0.5
11-N	0.39	205/165	3.0·3.5	10	0.73	++	0.138	70	27	NE	<0.5
12-N	0.32	165/205	3.0·3.5	10	0.63	++	0.108	70	25	NE	<0.5

Not 1: S respektive N anger södra och norra delen av sidotaget.

Not 2: Pallhöjden i sidotagets södra del var 15 m och i den norra 10 m.

Not 3: Sprängskador och färgbandning; 0 = osynliga eller mycket svaga, + = synliga, ++ = väl synliga.

Not 4: Summavikt i salvan av ANFO + Gelignite = 100%.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

4. Styckefallsmätningarna

Styckefallet från nr 11 av de tolv uppföljda sprängsalvorna visas i figur 8, jfr med rapporten i figur 6. Följande metoder att mäta styckefallet användes

- o Visuell bedömning
- o Skuträkning
- o Siktning
- o Fotografering med efterföljande digital analys

En sammanställning av resultaten finns i tabell 2.

Den visuella bedömningen omfattade salvans profil samt styckefallets medelstorlek, dess gradering och variationer i berghögen, se figur 6. Block större än 1 - 2 m^3 klassades som skut. De lades åt sidan vid lastningen och kunde då lätt räknas. I tabell 2 anges skutandelen av respektive salva.

Från 7 av salvorna togs provhögar om 8 - 12 ton ut för siktning. Massan bestämdes genom att väga lastbilen med sten och utan. Den utgör ca 0.1% av hela berghögens massa. Skoporna med provmaterial togs ur berghögens mitt. För att minimera subjektiviteten i urvalet togs skoporna där Bengt Niklasson bedömde att styckefallet var representativt.

Siktningen gjordes för hand, se figur 9, med maskvidderna 350, 200, 150, 100, 80, 50, 39.5, 19, 9.5, 4.75 mm osv. SveDeFo-rapporten /1/ visar alla erhållna styckefallskurvor.

Av berghögen efter varje salva togs ett antal bilder med vanlig småbildskamera, såväl före utlastning som när denna pågick. Bilderna togs i möjligaste mån vinkelrätt mot massornas yta med pålagd skala, från en lastmaskin på ca 5 m avstånd, se figur 10. Varje bild täcker ca 0.2% av berghögens massa om bildytan antas representera ett 1 m tjockt lager.

Bilderna av berghögen har sedan utvärderats med den utrustning av märket MOP-Videoplan som finns på avdelningen för bergteknik vid Luleå högskola. Metoden kräver manuell digitalisering av varje bild varefter en dator beräknar styckefallskurvan när väl skalfaktorer, bildyta, omvandlingsfaktorn från yta till volym, bergstyckenas formfaktor, maskstorlekar mm angetts.

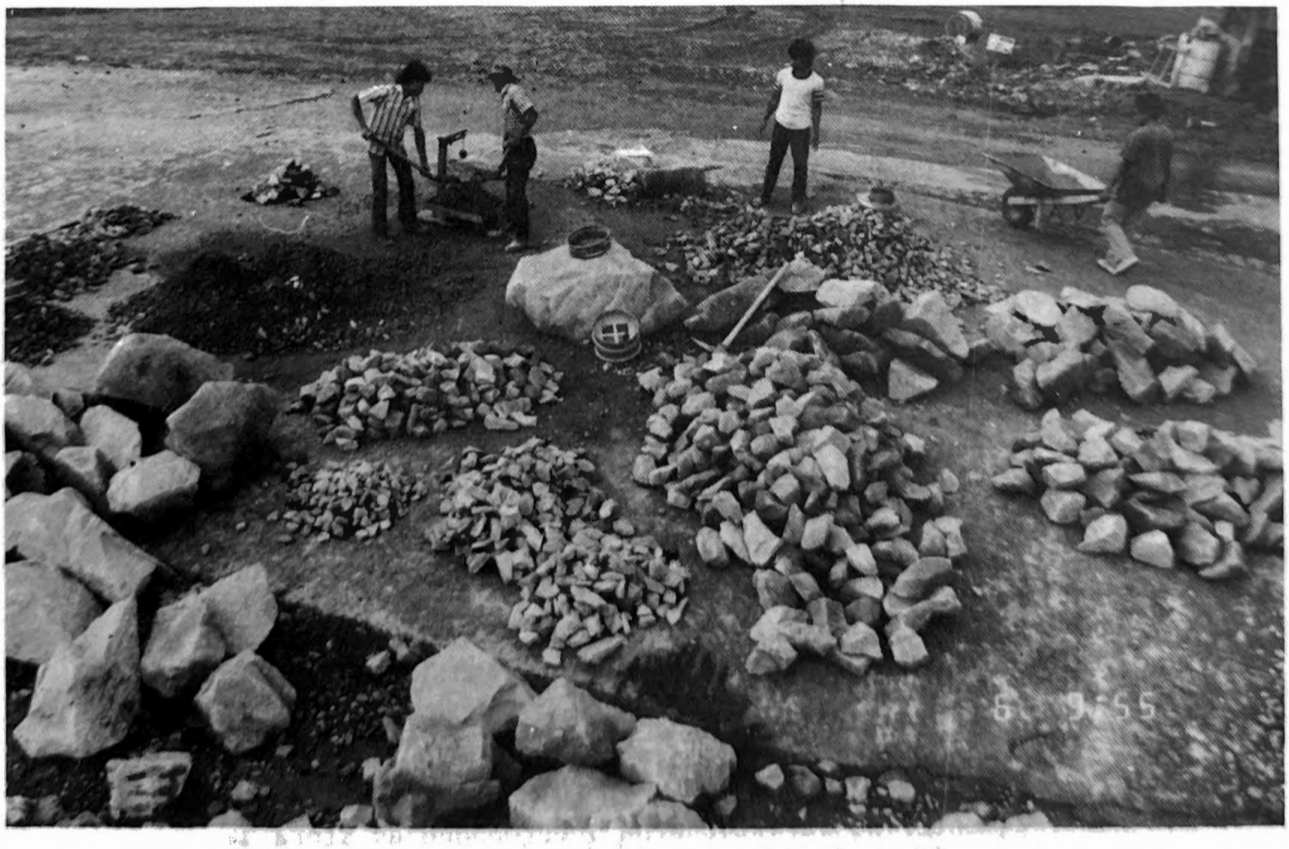
Nie och Rustan /5/ diskuterar olika felkällor hos metoden och anger ett totalfel på ca ± 25%. Följande felkällor undersöktes som ett led i vårt arbete:

1. Operatören, genom att tre olika personer, Sten Abrahamsson samt Nie Shulin och Jan Öqvist digitaliserade samma bild. Felet var ca ± 5%.

2. Antal bilder, genom att styckefallet från salvorna 4 och 7 beräknades på basis av både 5 och 10 bilder. Slutsatsen blev att när fragmenteringsvariationerna i berghögen är stora så

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

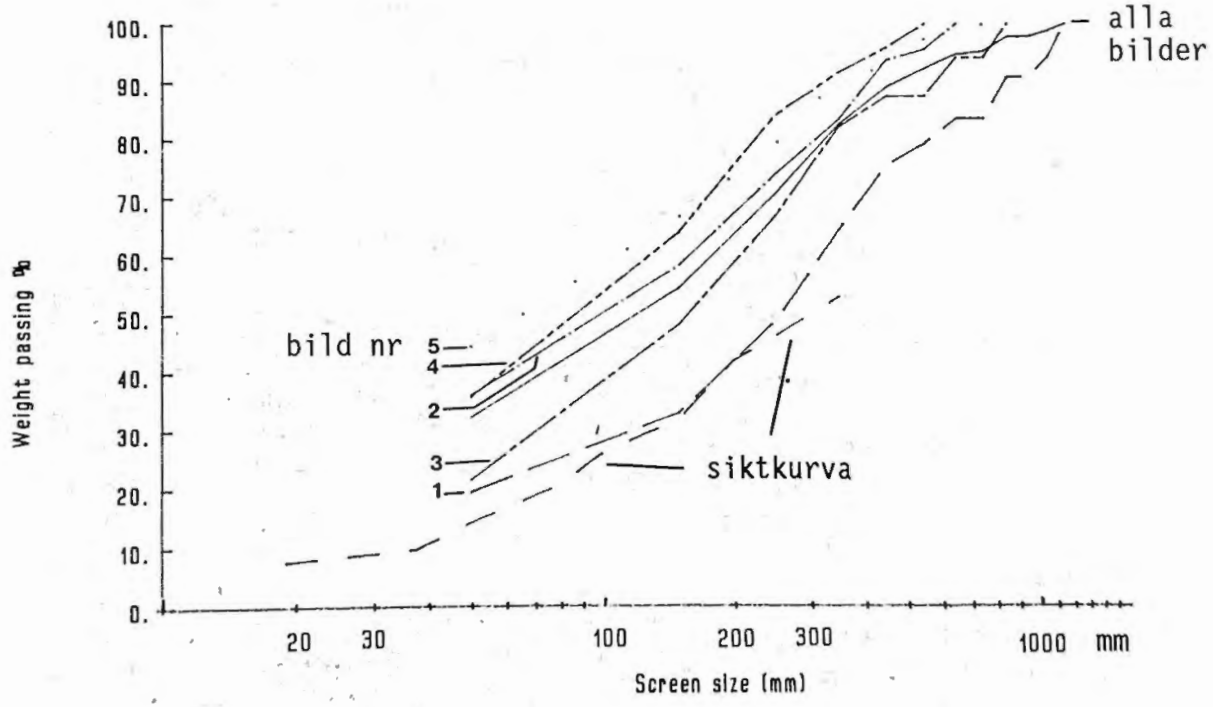
Figur 8: Berghögen efter salva nr 11.



Figur 9: Handsiktning av provhög från salva nr 6.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Figur 10: En av fem bilder från salva nr 12 som valdes ut för digitalanalys av styckefallskurvan.



Figur 11: Styckefallskurvorna för salva nr 6. Dels visas de enstaka resultaten för alla 5 bilder som valdes, dels medelvärdet för bildanalysen (heldragen linje) samt siktkurvan som tangerar kurvan för bild nr 1.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

måste bilderna väljas med omsorg i fall 5 bilder skall ge ett bra resultat. Figur 11 visar spridningen i bildanalysens styckefallskurvor. Värdena i tabell 2 baseras på 5 bilder.

3. Jämförelse med siktning, genom att två provhögar som sedan siktades också fotograferades för bildanalys. I ett av fallen överensstämde styckefallet från bildanalysen väl med siktkurvan. I det andra gav bildanalysen avsevärt grövre resultat, något som en materialsegregering i hanteringen av provhögen kan ha orsakat.

Bildanalysens styckefallskurvor har alla större finandel än siktkurvorna. Orsaken är troligen att datorprogrammet behandlar alla odigitaliserade tomrum mellan bergstyckena i bilderna som finandel, vilket också kan vara en felkälla.

Tabell 2 visar att bildanalysens medelstyckefall (k_{50}) har både ett lägre genomsnittsvärde och en mindre spridning än siktkurvornas k_{50}-värden. Båda skillnaderna kan förklaras av att den siktade provhögen bara representerar ca 0.1% av bergmassan medan 5 bilder representerar ca 1%, dvs 10 gånger så mycket.

Härav följer ju att siktresultaten är känsligare än bildanalysresultaten för stenar av en given storlek. Siktprovet från salva 6 innehöll t ex ett block om ca 1 m³ vilket väger omkring 2.5 ton och alltså utgör ca 25% av provhögens massa. Förekomsten av ett så stort block förrycker siktresultatet helt. Dess inverkan på bildanalysen är däremot minimal då det endast utgör ca 2.5% av den bergmassa som bilderna täcker.

Detta förklarar den stora skillnaden mellan siktat k_{50}-värde och bildanalysvärdet på 125 mm för salva 6. Figur 11 visar att om blocket räknas bort så sjunker det siktade k_{50}-värdet från 310 till 170 mm, vilket troligen är mer rättvisande.

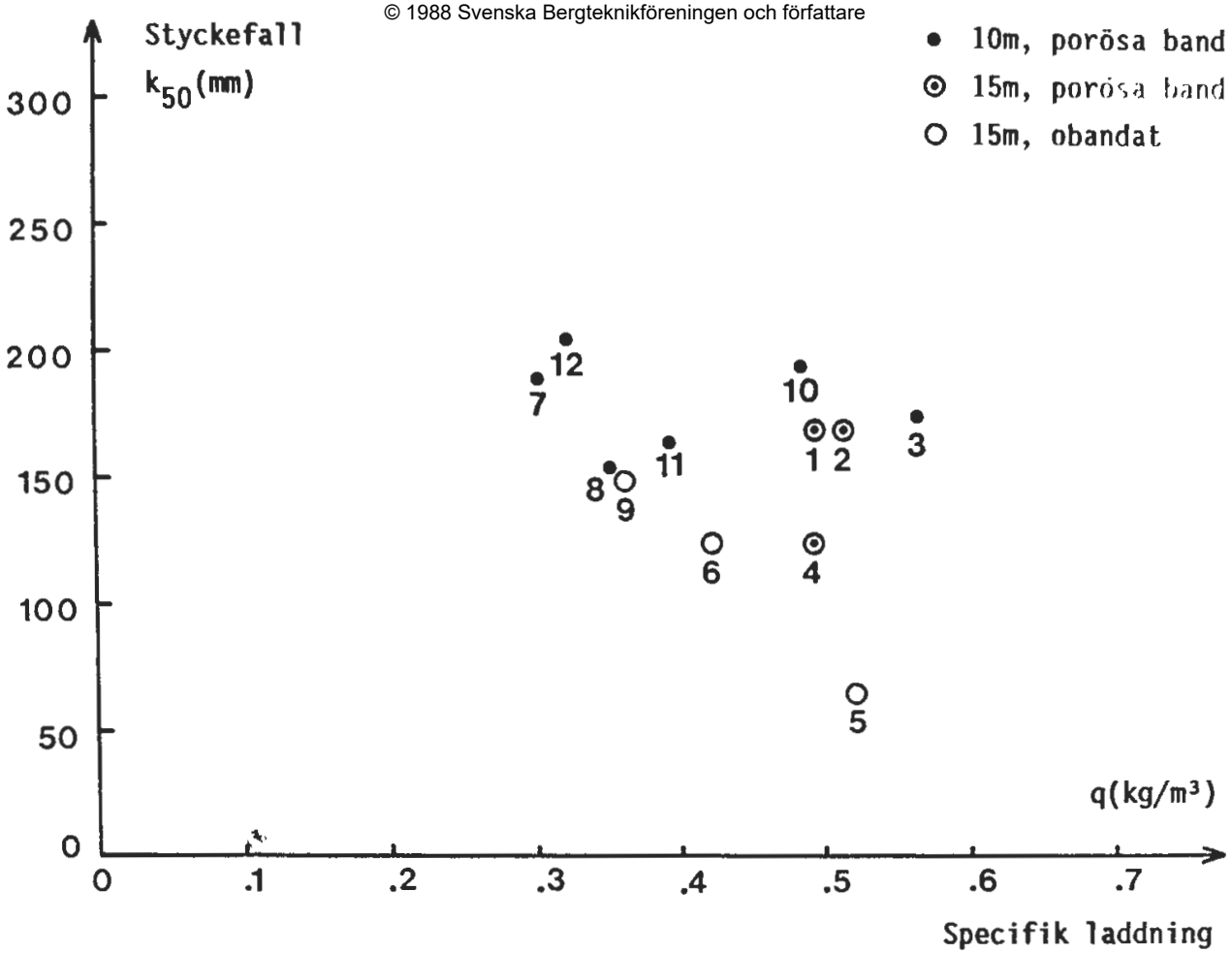
Även för salva 8 är skillnaden stor, ett siktat k_{50} på 325 mm mot bildanalysens 155 mm. I detta fall hittades ingen förklaring likt den för salva 6 och siktprovet som helhet är sannolikt orepresentativt. Vår slutsats blev alltså att bildanalysen är att föredra framför siktning i detta fall, även om metoden varken är särskilt noggrann eller enkel att använda.

5. Diskussion av resultaten

Medelstyckefallet k_{50} från bildanalysen av alla 12 salvorna visas som funktion av specifik laddning q i kg(ANFO)/m³ i figur 12. Spridningen i k_{50}-värdena är så stor att den tendens som syns till minskande styckefall (lägre k_{50}) med ökande laddningskoncentration (större q) inte är statistiskt säkerställd.

I fallet Tampomas kan vi alltså på rak arm inte säga annant än att styckefallet är oberoende av den specifika laddningen, trots att q varierar mellan 0.30 och 0.56 kg/m³. En noggrannare mätmetod för styckefallet, en större spännvidd i q-värdena eller

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 12: Medelstyckefallet, k_{50}, som funktion av specifik laddning för alla 12 salvor som följts i Tampomassidotaget. Punkterna visar resultaten från de 10 m höga pallarna i norra delen av sidotaget, cirklarna från de 15 m höga pallarna i södra delen. På pallfronten förekom porösa band hos alla salvor utom tre. Hos dessa, nr 5, 6 och 9, saknades de i stort sett.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

väsentligt fler uppföljda salvor hade möjligen kunnat ändra på detta men dessa åtgärder var inte praktiskt genomförbara inom ramen för projektet.

Eftersom k_{50}:s oberoende av q inte var väntat sökte vi emellertid efter samband mellan k_{50} och de andra parametrarna som varierade i Tampomassalvorna, se tabell 2. Följande samband erhölls

Sidotaqsområde eller pallhöjd: Dessa parametrar sammanfaller. Medelstyckefallet är avsevärt grövre i 10 m pallarna i norra delen av sidotaget än i 15 m pallarna i den södra delen, även med salva 5 undantagen. En genomgång av förhållandena i Tampomas och av litteraturen /1/ visar emellertid att pallhöjden knappast kan vara orsak till detta.

Den andra tänkbara orsaken är att bergstrukturen är olika i de två delarna av sidotaget. Om vi jämför den genomsnittliga horisontella snittytan för bergblocken enligt avsnitt 2 med den yta varje borrhål täcker, dvs försättning • hålavstånd, så får vi ett relevant mått. I den södra delen så är blockytan 5.8 m² och borrhålsytan 7.5 - 8.75 m², dvs 66 - 75% av alla block är genomborrade. I den norra delen är blockytan 2.7 m² och borrhålsytan 7.5 - 10.5 m², dvs 26 - 38% av alla block genomborrade.

Enligt nyare litteratur /1/ skulle detta ha gett ett lägre k_{50} i norra delen än i den södra, tvärtemot våra resultat. Den refererar emellertid till mer sprickigt berg än andesiten i Tampomas då genomborrningsprocenten legat på endast 2 - 18%.

Våra resultat stämmer bättre med tidigare svensk erfarenhet i mindre sprickigt berg, Larsson /6/. Hans sprängbarhetsfaktor s, mot vilken k_{50} är proportionell, är 0.4 för homogent berg och stiger till 0.6 för sprickigare berg. För samma specifika laddning och i övrigt lika förhållanden skulle alltså k_{50} kunna vara 50% större i sprickigt berg. I Tampomas är skillnaden 35% mellan norra och södra delen av sidotaget.

En fragmentering som styrs av de tidigare nämnda porösa banden är den troliga förklaringen till vårt resultat, se vidare nedan.

Sprickfrekvensen: För varje uppföljd salva har vi tillgång till linjekarteringsdata från pallen, se avsnitt 2, ur vilka sprickfrekvensvärden beräknats /1/. Dessa värden utgör mått på den lokala bergstrukturen men vi fann inget samband med det uppmätta medelstyckefallet.

Porösa band: Under karteringen av pallfronterna bedömdes för varje meter av fronten om de sprängskador och de färgband som senare visades sammanfalla med poröst och svagare berg, var osynliga eller mycket svaga, synliga resp. väl synliga. Se figur 5. Dessa bedömningar har sedan vägts ihop /1/ och pallarna delats in i grupper där vi förväntat oss ingen, måttlig respektive stark inverkan av banden på styckefallet, se tabell 2.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Det visade sig att för de tre pallar där de porösa banden i stort sett saknades, dvs nr 5, 6 och 9 i sidointagets södra del, så sjunker medelstyckefallet för salvorna kraftigt med ökande specifik laddning.

För övriga salvor i sidotagets södra del, dvs nr 1, 2 och 4, är medelstyckefallet inte längre avsevärt finare än i den norra delen. För dessa nio pallar hade vi förväntat oss måttlig eller stark inverkan av de porösa banden. För dem är styckefallet sammantaget oberoende av den specifika laddningen och k_{50}:s variationsbredd, 125 - 205 mm, sammanfaller väl med bandens medelavstånd om 100 - 200 mm.

Dessa samband tyder starkt på att de svaghetsplan som de porösa banden utgör styr fragmenteringen.

Specifik borrning: Dessa värden har beräknats som antal borrmeter per fast m³ lossprängt berg för respektive salva. Det är bara salvorna 3, 7 och 12 som skiljer sig från mängden. För dem finns naturligt nog ett samband med den specifika laddningen, men det finns inget samband med styckefallet.

Hållutning: Salvorna 10, 11 och 12 borrades med lutande hål. Bergmassorna var som väntat mer lättlastade och medelstyckefallet var möjligen något grövre än för salvorna med vertikala hål. Då de porösa banden förekom i alla tre pallarna är detta faktum emellertid en troligare orsak än hållutningen till den eventuella skillnaden i styckefallstorlek.

Sprängämnestyp: Andelen ANFO i salvan har skenbart ett samband med den specifika laddningen i tabell 2. Det riktiga sammanhanget är emellertid att tidpunkten då hålavstånd och försättning utökades, dvs efter salva 5, sammanfaller med regnigare förhållanden under laddarbetet och följaktligen med lägre ANFO andel i salvan.

Sprängstyrkan för hål med och utan ANFO har ju bedömts vara lika, se avsnitt 3, och något samband mellan andelen ANFO i salvan och medelstyckefallet finns inte heller.

Sprängningsriktning: Pallarna 3 och 8 i sidotagets norra del vätte mot NO, alla övriga mot SO. Det finns inget samband mellan sprängningsriktningen och styckefallet i vår uppföljning. En genomgång av ett stort antal tidigare salvor i Tampomas uppvisar inte heller något sådant samband.

Skutandel: Den sista kolumnen i tabell 2 visar uppskattad skutandel i bergmassorna efter varje salva. Salvorna i sidotagets södra del har en skutandel på 1-4%, de i den norra delen en skutandel på 0 - 1%.

Då förladdningsdelens storlek står i ungefärlig proportion till pallhöjden, 1.5 m på 10 m respektive 2.0 m på 15 m, kan detta knappast vara förklaringen till skillnaderna i skutandel. Något samband mellan skutandel och specifik laddning finns inte heller.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Det finns möjligen ett samband mellan liten skutandel och grovt styckefall och omvänt, men det är i så fall sekundärt. Det primära är sannolikt bergstrukturen. Skutandelen i södra Tampomas är i genomsnitt 4 gånger större än i norra delen vilket sammanfaller med förhållandet mellan blockstorlekarna, 4.6 m^3 respektive 1.1 m^3.

6. Slutsatser

Den viktigaste slutsatsen av vår fragmenteringsuppföljning är att där de porösa banden förekommer i Tampomas verkar de styra styckefallet så mycket att k_{50} är oberoende av den specifika laddningen. Vår omfattande bergmekaniska provning, som visar att banden är svagare än det omgivande berget, och uppsprickningens lokalisering till dessa stödjer slutsatsen.

Skillnaden i skutandel mellan norra och södra delen av sidotaget förklaras troligen av skillnaden i blockstorlek. Att den grovblockigare södra delen uppvisar ett finare styckefall förklaras sannolikt av att de porösa banden mer eller mindre saknades i tre av pallarna där. När de porösa banden saknas så styr sprängämneskoncentrationen styckefallet, berget blir mer lättsprängt och k_{50} sjunker kraftigt med ökande specifik laddning.

Möjligheten att använda styckefallsresultaten från Tampomas för att kontrollera en prognos, i vilken bergstrukturen är en variabel, är starkt begränsad. Det förväntade sambandet har i det närmaste reducerats till att en tidigare oobserverad finstruktur, de porösa banden, är helt avgörande. Denna var så vitt vi vet likartad där den förekom.

Att den homogena andesiten, dvs berget utan finstruktur, skulle vara mer lättsprängd stämmer med svensk erfarenhet men inte med utländsk. Man blir då tvungen att spekulera i en fragmenteringsmekanism som är svår att verifiera. Lägg härtill den relativt stora osäkerhet som finns i metoden att mäta styckefallet och begränsningarna framgår klarare.

När strukturfaktorn eliminerats återstår de 3 salvorna i den homogena andesiten. De utgör ett otillräckligt underlag för kontroll av en prognos och då de uppvisar det traditionella sambandet mellan styckefall och specifik laddning återstår i stort sett bara en jämförelse med traditonella styckefallsformler. SveDeFo:s formel, se Holmberg /7/, med bergkonstanten $c = 0.3$ kg/m^3 beskriver medelstycketalet i dessa salvor någorlunda väl. Den homogena andesiten är alltså lättsprängd med svenskt mått.

Vid fragmenteringsuppföljningens start i Tampomas var hålsättningen i borrplanen 2.5 • 3.0 m men styckefallet för fint för dammen. Under uppföljningens gång ändrades alltså denna till 3.0 • 3.5 m utan ändring av laddningsmängden i varje borrhål eller andra förhållanden. Styckefallelt steg inte nämnvärt och

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

den glesare hålsättningen kom att användas i den fortsatta produktionen. Härigenom kunde de rörliga kostnaderna för borrning och sprängning i Tampomas sänkas med 20 - 40%.

Härav drar vi slutsatsen att det betalar sig att satsa på en noggrann sprängteknisk uppföljning och att det kan vara värt att ta reda på om berget har en finstruktur som man kan dra fördel av.

7. Erkännande

Vi riktar ett varmt tack till platschefen för sidotaget i Tampomas, Mike Mercer, för hans stora tillmötesgående liksom till följande projektpersonal vid Mrica, projektchefen Claes Ljungberg, tekniska chefen Wilhelm Hemgren och produktionschefen Jan Stattin. Gunnar Nord, Skanska AB, skall ha stort tack för sin konstruktiva kritik av resultatsammanställningen samt Agne Rustan och medarbetare, LuH, för lån av utrustning för den digitala bildanalysen och instruktioner i dess användning.

8. Referenser

1. Abrahamsson, S, Niklasson, B och Ouchterlony, F: Fragmentation Monitoring of Production Blasts at Mrica.- SveDeFo rapport DS 1987:6.

2. Barton, N, Lien och R, Lunde, J: Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.- Rock Mechanics 6, 189-236, 1974.

3. Hoek, E och Brown, E T: Underground Excavations in Rock.- Inst. Min. Met., London, 1980.

4. Mäki, K: Bestämning av sprickbildning i kvarstående berg genom kärnborrning.- SveDeFo rapport DS 1985:5.

5. Nie, S-L och Rustan, A: Techniques and Procedures in Analysing Fragmentation after Blasting by Photographics Method.- Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, W L Fourney och R D Dick red, sid 36-47, SEM, Bethel CT, 1987.

6. Larsson, B: Redogörelse från några olika objekt betr. sprängning av höga och låga pallar - styckefall vid produktionssprängning.- Bergsprängningskommittens diskussionsmöte BK-74, sid 247-273, 1974.

7. Holmberg, R: Charge Calculations in Bench Blasting.- SveDeFo rapport DS 1974:4.