

MinBaS II

Mineral•Ballast• Sten

Område 1

Rapport nr 1.2.1

Optimal fragmentering vid sprängning II – sammanfattning av projektresultat



Projektet drevs 2007-2009 av Swebrec vid LTU med stöd av egna medel och SBUF (projekt 12138 Fragmentering och lastbarhet i bergtäkter). Sandvik Mining & Construction och Orica Mining Services deltog med naturainsatser. Arbetet utfördes vid NCC Roads bergtäkt i Långåsen vid Arlanda. Jehanders och Swerock deltog i referensgruppen.

Målen har varit att validera tidigare arbeten med designkurvor för Swerocks Vändletäkt och att utvärdera elektronisprängkapslar avseende finare styckefall och andra förbättringar. Målen har uppnåtts.

Den **tekniska slutrapporten** har titeln ”Optimal fragmentering i krosstäkter, fältförsök i Långåsen, MinBaS II slutrapport projekt nr 1.2.1” med författarna Finn Ouchterlony, Ulf Nyberg & Mats Olsson (Swebrec), Kristina Vikström (NCC Roads) och Per Svedensten (Sandvik Mining & Construction).

Fältarbetet bestod i en noggrann uppföljning av fem produktionssalvor. I en 0-salva togs mätmetoder fram för lastcykeltider/lastbarhet, krosseffektdata och styckefall med bildanalys med hjälp av examensarbetare från Bergsskolan. Övriga salvor innehöll 4 rader med ca 100 hål var i en 14-19 m hög pall. Ø89 mm borrhål borrade med datariggen Atlas Copco Smart Rig D9C och laddade med emulsionssprängämnet Titan 6080 SME användes.

Salva 1-N 20/5	Nonel	0,8 kg/m³	1-H	Nonel	1,1 kg/m³
rad 1: 3,4x3,4 m	2 hål / 25 ms i rad		2,9x2,9 m	2 hål / 25 ms i rad	
rad 2-4: 2,6x3,4 m	67 ms mellan rader		2,2x2,9 m	67 ms mellan rader	
Salva 2-H 26/6	Nonel	1,1 kg/m³	2-N	Nonel	0,8 kg/m³
rad 1: 2,9x2,9 m	2 hål / 25 ms i rad		3,4x3,4 m	2 hål / 25 ms i rad	
rad 2-4: 2,2x2,9 m	67 ms mellan rader		2,6x3,4 m	67 ms mellan rader	
Salva 3	3/9		elektronikkapslar	0,8 kg/m³	
rad 1: 3,4x3,4 m			10 ms mellan hål i rad		
rad 2-4: 2,6x3,4 m			67 ms mellan rader		
Salva 4	30/9		elektronikkapslar	0,8 kg/m³	
rad 1: 3,4x3,4 m			5 ms mellan hål i rad		
rad 2-4: 2,6x3,4 m			67 ms mellan rader		

Uppläggningsen av huvudförsökssalvorna 1-4 med nominella data. Skjutriktning uppåt i figur.

Huvudresultat i några punkter:

Användningen av elektronisprängkapslarna (0,8 kg/m³) gav flera oväntade resultat. Jämfört med Nonel-salvor med något lägre specifik laddning (0,72 kg/m³) erhöles:

- Ett märkbart grövre styckefall i salvorna, en uppgång från ca 160 till 200 mm
 - En märkbart kortare skopfyllnadstid, en minskning med drygt 8 sek från ca 35 sek
 - Ett märkbart lägre flöde genom krossen, ca 5-10 % minskning från 380 till 350 ton/h
 - Ett större energibehov vid krossning, ca 20 % ökning från ca 0,30 till 0,35 kWh/ton
- Observera de korta intervallen 5 och 10 ms i raderna.

Nonel-upptändning med högre specifik laddning, 0,99 jämfört med 0,72 kg/m³ gav:

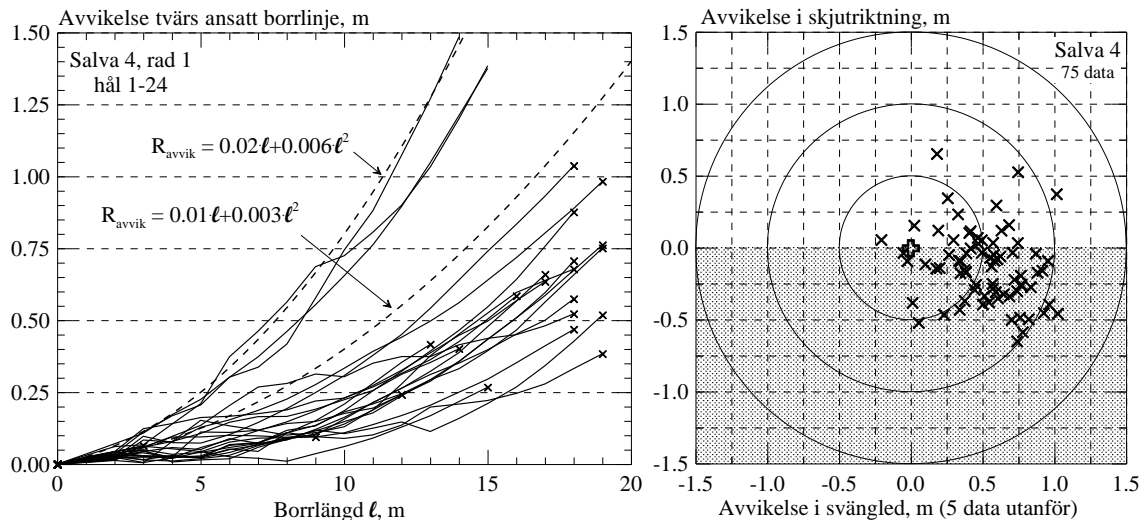
- Ett märkbart finare medelstyckefall i salvorna, en minskning från ca 160 till 120 mm
- En märkbart kortare skopfyllnadstid, minskning med knappt 10 sek från ca 35 sek
- Ett märkbart högre flöde genom krossen, ca 5 % ökning från 380 ton/h till 400 ton/h
- Ett lägre energibehov vid krossning, ca 15 % minskning från ca 0,30 till 0,25 kWh/ton.

Diskussion och utförligare resultat:

Under försöken mättes borrhålens påhugg och inriktning, borrhålsavvikelser, bergstrukturen på pallfronten ur 3D-bilder, försättnings- i första raden, markvibrationer och luftstötövåg vid angränsande objekt, effektförbrukning på förkross och bandvågsmotorer mm. Kompletterande mätningar av sprängskador i pallväggen, LA-tal, kulkvarnsvärde och Split-Hopkinson-hållfasthet gjordes. I fokus stod uttag av provhögar ur salvorna och siktning av dem både i täkt och i labb. Sist krossades även provhögar under krosseffekt- och bandflödesmätning.

Ur stereobilderna av pallfronten skapades med SMX BlastMetrix **3D-modeller** av berget som kunde fasas ihop med påhuggs-, hållriktnings- och hållängdsdata från borrhålen. Härur kunde **profiler** för den teoretiska försättnings- för första hållraden beräknas och åskådliggöras på cm/dm-nivå. Direkt ur modellerna kunde också en **strukturkartering** av berget göras.

Riggens påhuggs- och hållriktningsvärden är oftast mycket noggranna och hållriktningsvärdena och stämmer mycket väl med **felborrningsmätningarna**. Medelvärdena på tipp- och svängvinkeln ligger inom ca 0,1° från inställda värden på 11,2 respektive 0° med en standardavvikelse på 0,3-0,4°. Träffbildsdiagrammen för hållbottarna ser något olika ut i de fyra salvorna. I medel hamnar de 25 cm innanför den planerade borrlinjen och 50 cm till höger om den.



Böjningsfel och träffbildsdiagram för hål i salva 4.

På 20 m djup blir riktningselets bidrag till borrhållsavvikelsen bara 0,2 m men **böjningsfelets** bidrag ökar kvadratisk med borrhållsdjupet och kan vid botten vara upp till 5-7 gånger större, dvs. 1,0-1,4 m. Av de ca 350 inmätta hålen ligger bottenarna i 15% av fallen mer än 1 m ifrån den planerade borrhållslinjen. Jämför detta med försättningen 2,2 eller 2,6 m.

Markvibrationer och luftstötståg mättes vid vågstationen i tåkten (300-400 m) och utanför den på vågkontoret vid infarten (1,7 km) och vid Arlandas brandstation (3,3 km). I vibrations-signalerna syns inga pulser från enskilda språnghål. Vibrationernas amplitudspektra toppar normalt inom 5-10 Hz. Radfördröjningen 67 ms motsvarar 15 Hz. Den frekvensen och dess övertoner finns i vissa av signalerna, däremot inte de högre frekvenserna från de kortare fördröjningarna i raden. Amplituderna utanför tåkten ligger inom 0,4-1,1 mm/s och på vågstationen i tåkten uppmättes som mest 9,2 mm/s i vertikalled för salva 4.

Luftstötstågorna från salva 0 och 4 inducerar sekundära markvibrationer i brandstationen med knappt halva amplituden av de primära markvibrationerna. Lufttrycket är som mest ca 60 Pa vid brandstationen under 0-salvan och ca 40 Pa under salva 4. Tåktens riktvärde ligger på 100 Pa. Vid vågstationen i tåkten anländer luftstötstågen innan markvibrationerna dämpats ut. Maxvärdet där på 100 Pa ligger under det generella riktvärdet 500 Pa för undvikande av skada. Någon utpräglad luftstötstågssamverkan från elektroniksalvorna verkar inte ha inträffat.

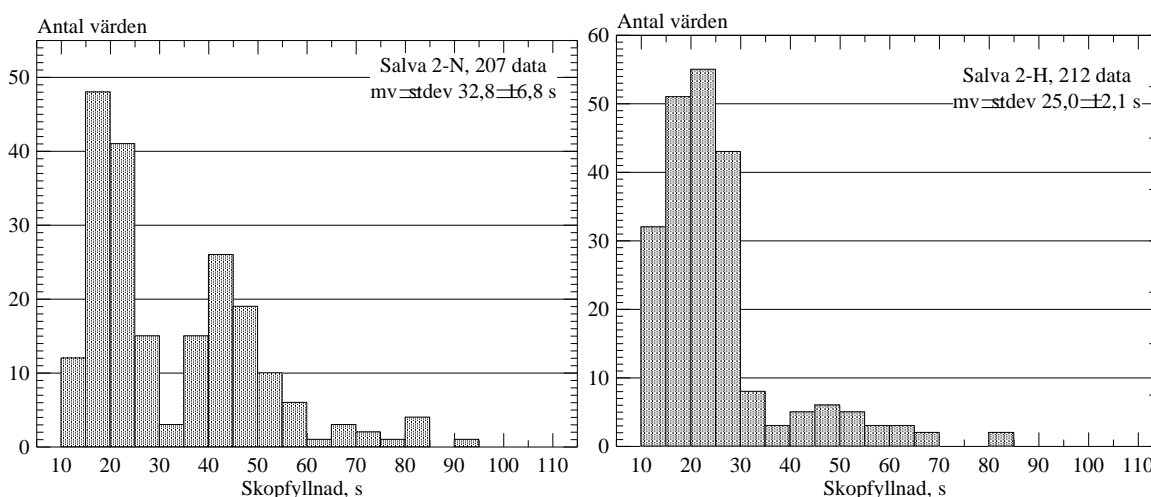
Styckefallsanalys gjordes på salvorna under utlastning med digital analys av bilder (Split Desktop). De visar en relativt osäker tendens till finare styckefall vid högre specifik laddning och grövre styckefall med elektronikupptändning, vilket stämmer med siktningsresultaten.

Vikterna från vågsystemen, skopvågar på lastmaskiner, vågen för färdiga produkter i asfaltverket och bandvågarna i krossverket ligger inom 1-2%. Under projektet installerades också **bandmotoreffekt**mätare för att mäta bandflöden. Mätdata loggades på en PC och bearbetades manuellt på PC. Under en period av 25 dagar kunde motoreffektvärdena jämföras med de traditionella bandvågsvärdena. Dataserier för ton/dag krossat totalt och ton/dag krossat finmaterial följer varandra väl utom två dagar då effektregistreringen inte fungerade.

Bandvågsdata för krossning av salvhögarna ger ett medelflöde av 315 ± 35 ton/tim. Skillnaderna mellan salvorna är inte märkbar men på gränsen att kunna tolkas som det. Inte heller dieselåtgången ($0,21 \pm 0,04$ liter/ton) skiljer sig märkbart mellan salvorna 1-4.

Samtidigt med bandmotoreffektmätare installerades en kontinuerlig **effektmätning på förkrossen**. När tomgångseffekt och stillestånd dras ifrån erhålls nettovärden på krosseffekten. Det finns svårklarade tidstrender i mätvärdena för krossmedeleffekt som troligen har mer med bergets geologi att göra än med hur hårt berget sprängts.

Lastcykeltiderna klockades manuellt av två personer med var sitt stoppur och användning av mellantider. En höjd specifik laddning eller elektronikuptändning ger skopfyllnad med färre omtag jämfört med en normal Nonel-upptänd salva. Omtagen syns som extra toppar i histogrammen. Vid höjd specifik laddning ökar andelen skopfyllnader utan omtag från drygt 50% till över 80%. Tidsvinsten är i medel nästan 10 sek på ca 35 sek. Andelen skopfyllnader utan omtag ligger för elektroniksälvorna på 70-80% och tidsvinsten är något mindre, ca 8 sek.



Skopfyllnadstider för salva 2; t.v. salvdel med normal specifik laddning, t.h. hög specifik laddning.

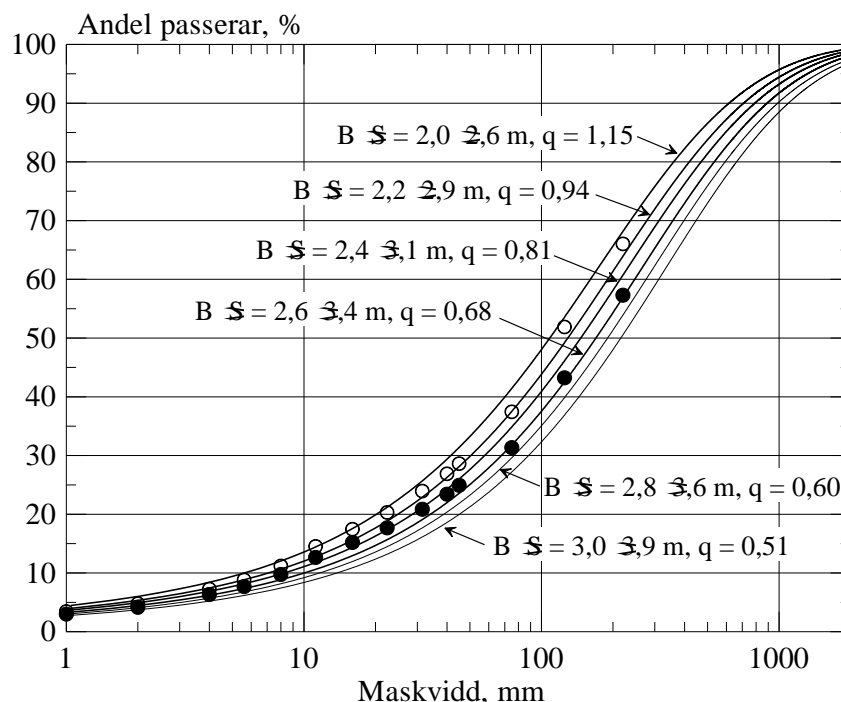
Under utlastning byggdes **11 st provhöggar om ca 400 ton** var upp, 2 var från salva 1 och 2, 3 från salva 3 och 4 från salva 4. Högarna homogeniserades och fotograferades för styckefallsbestämning med Split Desktop. Därefter siktades ca 100 ton med ett mobilt siktverk inom området 40/200 mm. Prov för labbsiktning 0-100 mm togs också och **kompleta styckefallskurvor för provhögarna konstruerades med hjälp av Swebrec-funktionen**.

Huvudfaktorerna **specifik laddning och upptändning ger stort utslag på styckefallet** i provhögarna. En högre specifik laddning med Nonel-upptändning ger ett betydligt finare styckefall och elektronikuptändningen ger förvånansvärt nog ett betydligt grövre styckefall. Alla övriga data för berget och sprängningarna som samlats in och på förhand bedömts kunna inverka på sprängningsresultatet har haft en betydligt mindre inverkan på styckefallet.

Krossningen av provhögarna följdes upp med samma metoder som för salvorna. Totalt krossades ca 4600 ton under fyra dagar. Alla provhögarna utom en med pegmatit från salva 4 gav nära nog 1/3 finmaterial 0/32 mm ut från förkross oavsett medelstyckefallet på inmatat berg. Okänsligheten för storleken på ingående sten kan möjligen förklaras av att krossen när den arbetat satsvis mest krossat en sten i taget, s.k. "single particle breakage" och att krossning och sprängning verkar ge lika mycket relativ finandel vid sönderbrytningen.

Högst krossflöde och lägst specifikt energibehov (kross-medeleffekt, kWh/ton) erhöles för provhögarna från Nonel-sälvorna med hög specifik laddning.

Ur data har **designkurvor för styckefallet** vid pallsprängningen med Nonel-upptändning konstruerats. Metodiken har förbättrats i och med att hänsyn tas till att skuten lades åt sidan innan provhögarna byggdes upp. Formlerna ges i bilaga och tillåter ändring av pallhöjd, hålmönster (försättning \times hålavstånd, B \times S), avladdning, håldiameter och sprängämne.



Designkurvor för Nonel-salvor i Långåsen med olika bormönster (B \times S) el. specifik laddning, q (kg/m³).

Som sammanfattning kan sägas att användningen av **elektronikkapslarna gav flera oväntade resultat**. Jämfört med Nonel-salvor med något lägre specifikladdning erhöles:

- ett märkbart grövre medelstyckfall i salvorna, en uppgång från ca 160 till 200 mm,
- en märkbart kortare skopfyllnadstid, en minskning med drygt 8 sek från ca 35 sek,
- ett märkbart lägre flöde genom krossen, ca 5-10% minskning från 380 till 350 ton/tim och
- ett större energibehov vid krossning, ca 20% ökning från ca 0,30 till 0,35 kWh/ton.

Nonel-upptändning med högre specifik laddning, 0,99 jfrt med 0,72 kg/m³, gav:

- ett märkbart finare medelstyckfall i salvorna, en minskning från ca 160 till 120 mm,
- en märkbart kortare skopfyllnadstid, en minskning med knappt 10 sek från ca 35 sek,
- ett märkbart högre flöde genom krossen, ca 5% ökning från 380 till 400 ton/tim och
- ett lägre energibehov vid krossning, ca 15% minskning från ca 0,30 till 0,25 kWh/ton

En enkel **kostnadsuppskattning** görs för de tre salvtyperna som studerats i Långåsen. Nonel-salvorna är 0,7-1,8 kr/ton billigare än elektroniksolvorna beroende på om lastningen eller **krossningen är flaskhalsen**. När krossningen är flaskhalsen ger den lägre kapaciteten och den högre krossenergin det högre värdet. Nonel-salvorna ger ungefär samma kostnad oavsett specifik laddning.

För det mer realistiska alternativet att **lastningen är flaskhalsen** har en mer detaljerad kostnadsanalys gjorts. Elektroniksolvorna är även nu dyrare för själva losshållningen, ca 0,3-1,5 kr/ton, men övriga kostnader är mycket beroende av lokala förhållanden och kan slå åt båda håll.

Vid så små kostnadsskillnader som de som redovisas här blir **kalkylerna känsliga** för hur de utformas, för ingående data och faktorer som utelämnats som ändrade investeringsbehov, ändrad produktkvalitet och prisbilden för olika produkter. Ett försök att uppskatta den sista effekten görs med Sandvik Plant-Designer[®]. En slutsats är att om produkter som vidareförädlas i anläggningen betingar ett högre pris så kan det väga över till fördel för elektronik-kapslarna. En förväntad framtida prissänkning på kapslarna har inte heller räknats med.

Framtida utvecklingsarbete

För att få ett säkrare underlag för att bedöma effekten av att använda elektronik-kapslar och för kostnadskalkylerna behöver elektroniksälvor dels med andra tändplaner, dels i andra bergförhållanden, följas upp med metoder liknande dem vi använt i detta projekt.

I projektet har använts flera **intressanta och utvecklingsbara tekniker**:

- *Borrhålsavvikelsemätningar* som visar att påhuggs- och inriktningsfelen är små jämfört med böjningsfelet i botten av en 20-m pall. Mätningarna borde integreras med riggen.
- *MWD-mätningar* med riggen som har potential för bedömning av sprängbarhet och sprickstrukturer i salvan.
- *Stereofotografering* av pallfronten som dels medger strukturkartering direkt i bild, dels kan ge noggranna försättningsprofiler för hålen i salvan.
- *Styckefallsmätning* ur 2D-bilder av salvan är en svag teknik som förutsätter manuell retuschering av kantnätet för att ge rättvisande resultat. Ännu oprövad 3D-teknik finns nu.
- *Bandmotoreffekt-mätning* som kan komplettera eller ersätta bandvågar i framtiden.
- *Krossmotoreffekt-mätning* som medger en mätning av nettoeffekt när tomgångseffekt och stillestånd kan subtraheras.

En nackdel är att **datainsamlingen** inte använder ett gemensamt gränssnitt och att standardiserade analysrutiner saknas. Detta borde åtgärdas för framtiden. Likaså borde beskrivningen av bergets sprängbarhet i designformlerna utvecklas.

Det är slutligen tveksamt om designformlerna kan användas till prognoser om utfallet av tändplaner med den radikalt **kortare fördröjning** på 1-2 ms, främst i raden, som elektronik-tändare medger. Projekt med Vinnova-finansiering som kan komma att ge svar på detta pågår vid Swebrec under år 2009-2011.

Kontaktuppgifter:

Finn Ouchterlony, LKAB professor i bergsprängningsteknik

Swebrec, Swedish Blasting Research Centre

Luleå Tekniska Universitet

tel: +46-10-4801854, mobil: +46-70-6318386

mail: finn.ouchterlony.swebrec@ltu.se eller finnouchterlony@swebrec.se