© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Fragmenteringsförsök vid NCC:s täkt i långåsen, effekten av höjd specifik laddning eller elektronikupptändning

Finn Ouchterlony, Ulf Nyberg och Mats Olsson, Swebrec vid LTU
P-O Andersson, Linus Nyqvist och Kristina Vikström NCC Roads
Jan Bida, Bergsskolan
Thomas Geidby, Orica
Per Svedensten, Sandvik Mining and Construction.

Sammanfattning

Under 2007–2009 har projektet Optimal fragmentering vid sprängning del II genomförts som ett MinBaS-projekt. Arbetet har utförts vid NCC Roads bergtäkt i Långåsen vid Arlanda. Målen har varit att validera tidigare arbeten med designkurvor för Swerocks Vändletäkt och att utvärdera elektroniksprängkapslar avseende finare styckefall och andra förbättringar.

Fältarbetet har bestått i en noggrann uppföljning av fem produktionssalvor. I en 0-salva tog vi fram mätmetoder för lastcykeltider/lastbarhet, krosseffektdata och styckefall med bildanalys. Övriga salvor innehöll 4 rader med ca 100 hål var i en 14–19 m hög pall. Ø89 mm borrhål laddade med emulsionssprängämnet Titan 6080 SME användes. I salva 1 och 2 användes ett tätare hålmönster i ena halvan. Den specifika laddningen blev därmed högre, ca 1,0 mot normala 0,7 kg/m^3. Salvorna tändes med Nonel, 2 hål per 25 ms intervall i raden och 67 ms mellan raderna. I salva 3 och 4 användes normalt hålmönster och i stället elektronikkapslar med 10 resp. 5 ms fördröjning mellan borrhålen i raden och 67 ms mellan raderna.

Under uppföljningen mättes borrhålens påhugg och inriktning, borrhålsavvikelser, bergstrukturen på pallfronten ur 3D-bilder, försättningar i första raden, markvibrationer och luftstötvåg vid angränsande objekt, effektförbrukning på förkross och bandvågsmotorer mm. I fokus stod uttag av provhögar ur salvorna och siktning av dem både i täkt och i labb. Sist krossades även provhögarna under krosseffekt- och bandflödesmätning innan analysen vidtog.

Statistik för ingående data ges och ur siktdata hela styckefallskurvor för salvorna. Dessa har använts för att ta fram designformler för Nonel-salvor. Analysen tar hänsyn till att provhögarna saknar skut och till ny kunskap om kurvornas lutning. Formlerna baseras på salvornas geometri, laddningsdata och bergmassans egenskaper. De kan användas till en beräkningsrutin för styckefallet och då kan följden av att ändra oladdad längd eller håldiameter uppskattas.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Användningen av elektronikkapslarna gav flera oväntade resultat. De kan kort sammanfattas som att jämfört med Nonel-salvor med något lägre specifikladdning erhölls:

- ett märkbart grövre medelstyckfall i salvorna, en uppgång från ca 160 till 200 mm,
- en märkbart kortare skopfyllnadstid, en minskning med knappt 9 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.

Inverkan av Nonel-upptändning med högre specifik laddning, 0,99 jfrt med 0,72 kg/m^3, blev:

- ett märkbart finare medelstyckfall i salvorna, en minskning från ca 160 till 120 mm,
- en märkbart kortare skopfyllnadstid, en minskning med drygt 9 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 kostnadsjämförelse av alternativen Nonel-salvor med normal eller hög specifikladdning och elektroniksalvor med normal specifik laddning i Långåsen görs också. Nonel-salvorna med hög specifik laddning skulle dra de lägsta kostnaderna om krossen är flaskhalsen. Den högre losshållningskostnaden kompenseras av mindre skutknackning, snabbare skopfyllnad och snabbare och mer energieffektiv krossning. Skillnaden är liten och kan möjligen uppvägas av t.ex. sämre kvalitet på grova produkter, som 32/64 mm.

För elektroniksalvorna uppvägs en lägre skutknackningskostnad och snabbare skopfyllnad av långsammare och mindre energieffektiv krossning så kostnaden för EPD-kapslarna gör salvorna ca 2 kr/ton dyrare. Om lastningen är flaskhalsen i täktens flöde kan kostnaderna sjunka med ca 1 kr/ton och med lägre kostnader för kapslarna kan kostnaderna komma att hamna i nivå med dem för Nonel-salvor med normal specifik laddning. Det är också tänkbart att elektroniksalvor med andra tändplaner kan ge bättre resultat, t.ex. i form av finare styckefall.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Inledning

Under forskningsprogrammet MinBaS I genomförde Swebrec tillsammans med bl.a. Swerock projektet Optimal fragmentering i krosstäkter i Vändletäkten [1,2]. Syftet var att närmare kvantifiera fragmenteringen på olika sätt. Bl a togs s.k. designkurvor fram. Med hjälp av dessa kan man utgående från befintlig ladd- och tändplan bestämma hur styckefallsfördelningen ändras när hålmönstret i borrplanen ändras.

Gränserna för ändringarna angavs till en specifik laddning i intervallet 0,3-0,8 kg m^3. För värden runt 0,5–0,6 kg/m^3 är grunden data ur siktade försökssalvor, för övriga värden har siktdata extrapolerats med hjälp av Kuz-Ram-modellen [3] i vilken Rosin-Rammler-fördelningen ersatts med Swebrec-fördelningen [4]. Designkurvorna visar t.ex. att andelen bärlagerfraktion i salvan, som normalt låg runt 15 %, skulle kunna ändras i intervallet 10–20 %. Liknande beräkningar kan göras för en godtycklig fraktion. Omvänt kan man utgående från en önskad andel av en given fraktion beräkna vilken specifik laddning som behövs.

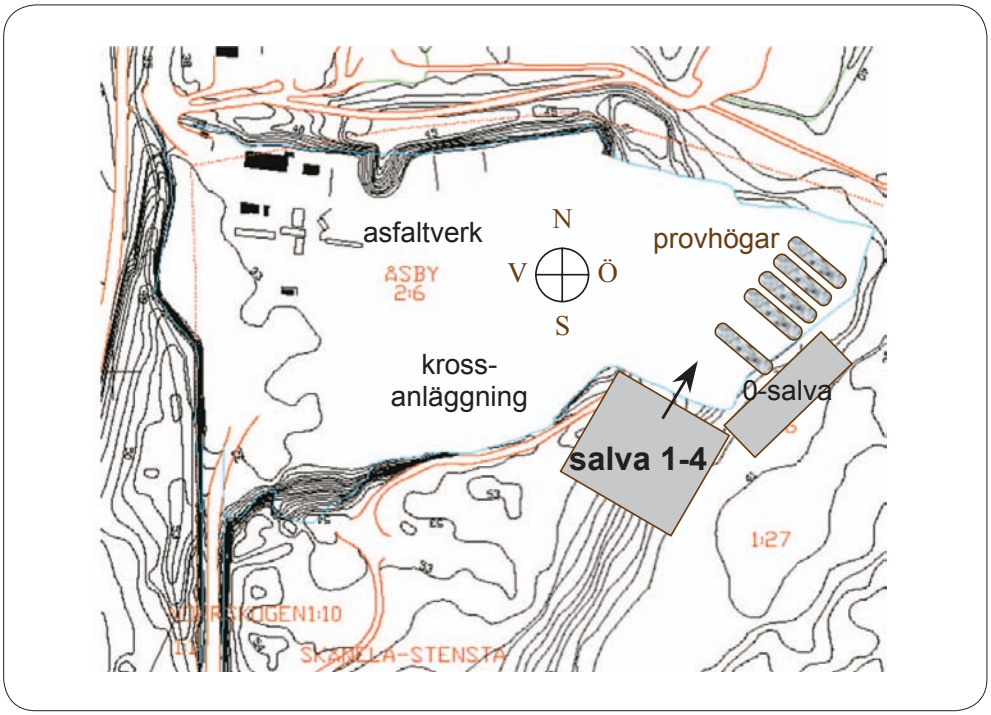
Detta arbete har fått en fortsättning i forskningsprogrammet MinBaS II genom projektet 1.2.1 Optimal fragmentering i sprängning II som startade 2007 och vars fältdel genomfördes 2008. Målet för det nya projektet har varit att:

> *Att validera de arbeten med designkurvor i Vändletäkten som gjordes under MinBaS I programmet. Vidare skall utvärderas användning av elektroniksprängkapslar med syfte att få både finare styckefall och andra förbättringar vid pallsprängning.*

Projektet har haft ett brett industristöd där förutom täktägaren NCC Roads, Orica Mining Services, Sandvik Mining and Construction, Bergsskolan i Filipstad, Nitro Consult, Jehanders och Swerock har deltagit med egeninsatser i projektet. De största egeninsatserna har täktpersonalen i Långåsen stått för. MinBaS-programmet, Swebrec och SBUF har stått för finansieringen av projektet som hade en ursprungsbudget på 3,2 Mkr. Projektet har följts av en projektgrupp där även Jehanders och Swerock varit representerade. En viktig del av datainsamlingen i projektet har varit de tre examensarbeten genomförda av sex teknologer som Bergsskolan ställt upp med [5–7]. BK-bidraget bygger på projektets slutrapport [8].

Täkten i Långåsen ligger alldeles öster om Arlandas bana 3. Den drivs av NCC Roads AB. Man hyr in borrningen från NCC Roads AB, Nord, lastningen till kross från Värmdö Schaktmaskiner AB och krossningen från AB Krossekonomi. Dessutom har man egna lastmaskiner. I täkten finns också ett asfaltverk som ägs av NCC Roads AB. Täktens utseende ges i Figur 1.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 1: Försöksplats Långåsen med asfaltverk, kross, salvplacering och provhögar. Platsen 0-salva markerar salvan som sköts innan de fyra MinBaS-salvorna.

I täkten dominerar en grå, fin- till medelkorning granodiorit (1–3 mm) med karaktäristiska amfibolkristaller (1–2 mm). Den innehåller 30–40 % kvarts, ca 50 % fältspat samt biotit mm. Den är fattig på mikrosprickor, har god kornfogning och låg omvandlings- och vittringsgrad i försöksområdet. Grovkristallina (2–4 cm) gångar av pegmatit uppträder relativt frekvent, se Figur 2. De kan ha en bredd om 0,5–1 m och en längd om ibland 10 m. Ett tjugotal vertikala till subvertikala diabasgångar genomkorsar berggrunden i riktning N 20–70° O. De är storleksmässigt lika pegmatitgångarna. De är ibland är skjuvade och avbrutna. Spricktektoniken inom täktområdet domineras av riktningen N 20-70° O och

Figur 2: Pegmatitgång, del av fronten på salva 1. Fronten stryker åt höger 66° V.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

sprickorna stupar huvudsakligen brant åt sydost. Mindre dominerande spricksystem finns med riktningarna N 40-50º V, O-V och N-S.

I Långåsen skjuts i genomsnitt en salva med minst 4 rader om 30-40 000 ton i månaden. I rad 1 är normalt försättningen 3,4 m för att minska risken för kast, i övriga rader är försättning och hålavstånd B´S = 2,6´3,4 m. Salvan laddas med bulkemulsionssprängämne typ Titan 6075 eller 6080 från Orica till en specifik laddning av ca q = 0,8 kg/m3. Den tänds upp med Nonel Unidet, typiskt två hål per 25 ms intervall och 67 ms fördröjning mellan raderna.

Utlastningen av salvorna gjordes först med hjullastaren Caterpillar 988F och sen med en Cat 988H. Skuten (0,9´0,9 m) från en salva läggs åt sidan för att sedan knackas med hydraulspett monterat på en grävmaskin. Resten av salvan körs med hjullastaren direkt till förkrossen, en käftkross modell Svedala Arbrå R120´100. Efter förkross transporteras materialet med bandtransportör till första sikten, som kan producera en finfraktion 0/32 mm, 0/63 mm eller 0/90 mm. Grovfraktionen transporteras till mellanupplag med bandtransportör och processas sen vidare av anläggningens två konkrossar och en VSI (vertikal slagkross) samt ytterliggare två siktar.

Försökens uppläggning och genomförande

Försöksplatsen valdes i SÖ delen av täkten där brytningen pågick, se Figur 1. Ett förförsök (0-salva) gjordes där pallhöjden var lägre för att de första examensarbetarna [5] skulle kunna utveckla sina mätmetoder.

De fyra egentliga MinBaS-salvorna sköts bakom varandra där pallhöjden var högre. De hade skjutriktningen 24,1°O vilket sammanfaller med den dominerande sprickriktningen. Salvornas principiella uppläggning och nominella data visas i Figur 3.

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		

Figur 3: Uppläggningen av försökssalvorna med nominella data. Skjutriktning uppåt i figur.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Salvstorleken anpassades efter produktionens krav. Varje rad hade ca 25 st borrhål och var alltså ca 80 m lång. Nonel-salvorna delades i två delar, en med normal specifik laddning, salv-delarna 1-N och 2-N, och en men hög specifik laddning, salvdelarna 1-H och 2-H. Salvdel 2-H placerades bakom salvdel 1-N och 2-N bakom 1-H för att kompensera systematiska skillnader i geologi, pallhöjd mm i sidled, jfr arbetet i Vändletäkten [1, 2]. Upptändningen gjordes i hörnet närmast krossen, dvs. överst t.v. i Figur 3.

Enligt planen skulle elektroniksalvorna också ha referensdelar upptända med Nonel. Olikheterna i tändintervall ansågs av projektgruppen emellertid medföra stora risker för ryckare med detonationsavbrott och därmed bortfall av hål i gränssnittet mellan salvdelarna. I och med att alla salvorna ligger ihop så ansågs dessutom salvdelarna 1-N och 2-N ge tillräckligt med relevanta referensdata.

Borrningen gjordes med en ny Atlas Copco SmartRig D9C med Atlas Copco 2560 hydraulborrmaskin med 25 kW effekt, Sandvik borrsträng T45 med Ø76 mm styrrör bakom en semi-ballistisk Ø89 mm Retrac-krona. För att undvika för stora variationer i håldiameter böts kronorna när de slitits till Ø86 mm i stället för som normalt till Ø80 mm.

Fördröjningstiderna i elektroniksalvorna diskuterades ingående av projektgruppen. Orica talade för att använda 8 ms fördröjning i raden och samtidig upptändning av topp- och bottentändare. Vid försök i Råsta-täkten [9] hade detta gett både bra styckefall och ändå undvikit den höga luftstötvåg som mycket korta fördröjningar annars kan ge. Utländska försök pekar på att betydligt kortare fördröjningar behövs för att uppnå den stötvågssamverkanseffekt som anses ge finast styckefall, se Vanbrabant & Espinosa [10] och Rorke [11].

Projektgruppens kompromiss blev att behålla fördröjningen mellan raderna, 67 ms, att börja med 10 ms fördröjning i raden i salva 3 och sedan minska till 5 ms i salva 4. Topptändarens initiering fördröjdes 6 ms jämfört med bottentändarens så att topptändning bara skulle träda in om botteninitieringen inte fungerade. Man lämnade då möjligheten öppen att skjuta en extrasalva med ännu kortare fördröjning i raden om resultaten av salva 3 och 4 blivit bra och om inte problem med luftstötvågsnivåerna uppstått.

I försöken användes elektroniksprängkapslar av typen i-kon™ från Orica Mining Systems. De kan programmeras i steg om 1 ms inom intervallet 0–15000 ms. Då upptändningstiderna understiger 1300 ms är noggrannheten bättre än ±0,13 ms för elektronik och tändpärla.

Uppföljningen av själva sprängsalvorna indelades i två delar, före-under samt efter. Före och under sprängning gjordes följande mätningar på MinBaS-salvorna:

- 3D-fotografering för bl.a. strukturkartering av pallfronterna
- MWD-mätning under borrning, salva 3 och 4 (SmartRig)
- Mätning av borrlängd och GPS-inmätning av borrhålspåhugg (SmartRig)

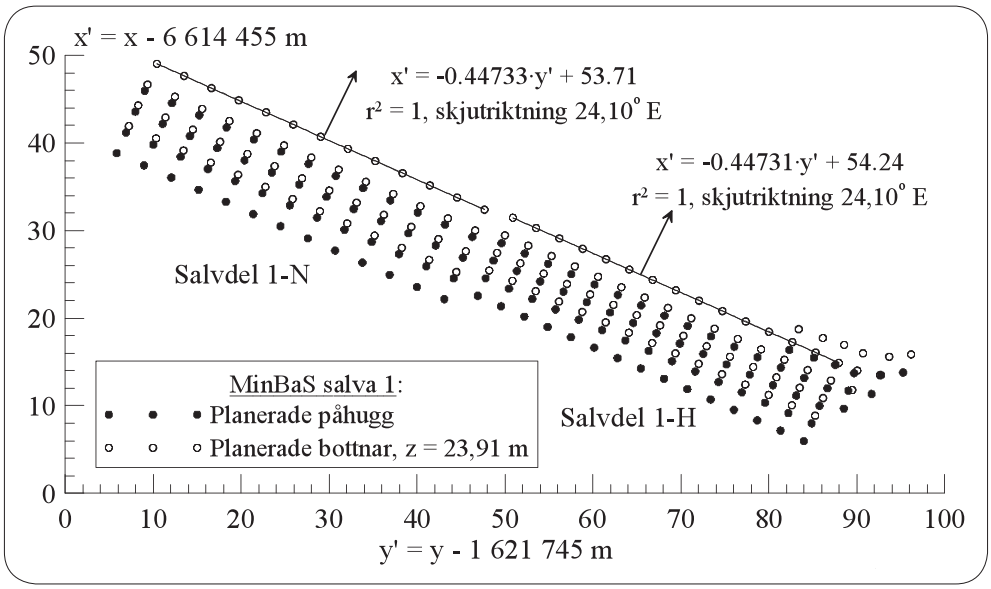
© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

- Mätning av borrhålsavvikelser i alla säkra hål (Transtronic Devibench)
- Beräkning av försättning i första rad
- Registrering av laddade mängder i enskilda hål
- Mätning av VOD, markvibrationer och luftstötvåg
- Videofilmning av salvorna.

På 0-salvan gjordes endast ett fåtal av dessa mätningar.

Den första salvan sköts den 23/4 2008 och den sista den 30/9. Under utlastningen lades ungefär av 25:e skopa från salvhögen undan i s.k. provhögar om ca 400 ton. Från salva 1 och 2 togs två provhögar var ut, från salva 3 tre st och från salva 4 fyra st. När den sista salvan lastats ut vidtog en kampanj med siktning och krossning av materialet i provhögarna, som dessförinnan homogeniserats genom omgrävning och utjämning. Denna kampanj avslutades den 6/11. Under större delen fältförsöken fanns projektpersonal på plats i täkten.

Figur 4 visar den teoretiska borrplanen för salva 1 som upprättats med borriggen, utgående från jämn bottennivå. Sådana finns för alla salvorna. För salva 3 och 4 finns också verkliga borrplaner, dvs. påhuggspunkter mätta med GPS och beräknade hålbottnar utgående från med riggen mätta påhuggsvinklar och borrdjup samt antagande om raka hål.



Figur 4: Borrplan för salva 1. Notera olika tätt borrhålsmönster i salvdelarna.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Figur 5 visar pallfronten för salva 1.

Figur 5: Fronten på salva 1 före sprängning. Från öster (t.v.) till väster (t.h.).

Figur 6 visar salvhögen från salva 1.

Figur 6: Salva 1. Salvdel 1-H med hög specifik laddning närmast kameran.

Efter sprängningen gjordes två serier av mätningar. Den första gjordes av examensarbetarna från Bergsskolan i samband med utlastnings- och krossningsarbetet [5-7]:

- Tidtagning på lastmaskinens arbete i salvhögen och transport till kross samt mätning av bränsleåtgång.
- Fotografering av salvhögen vid olika tillfällen för bestämning av styckefallet med bildanalysprogramvara.
- Registrering av krossenergi och krossade massor på dygnsbas med täktens system.
- Mätning av krosseffekt och krossade och siktade massor direkt efter förkross genom kontinuerlig loggning av data (salva 3 och 4).

Den andra serien mätningar efter sprängning gjordes i samband med siktnings- och krossningskampanjen. Det främsta syftet med denna kampanj var att bestämma styckefallet i provhögarna genom att väga så många siktade fraktioner som möjligt.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Totalt siktades ca 1 100 ton och krossades ca 4 600 ton berg under denna kampanj. Ett par homogeniserade provhögar visas i Figur 7, sorteringsutrustningen i Figur 8 och principerna för siktningsarbetet i Figur 9.

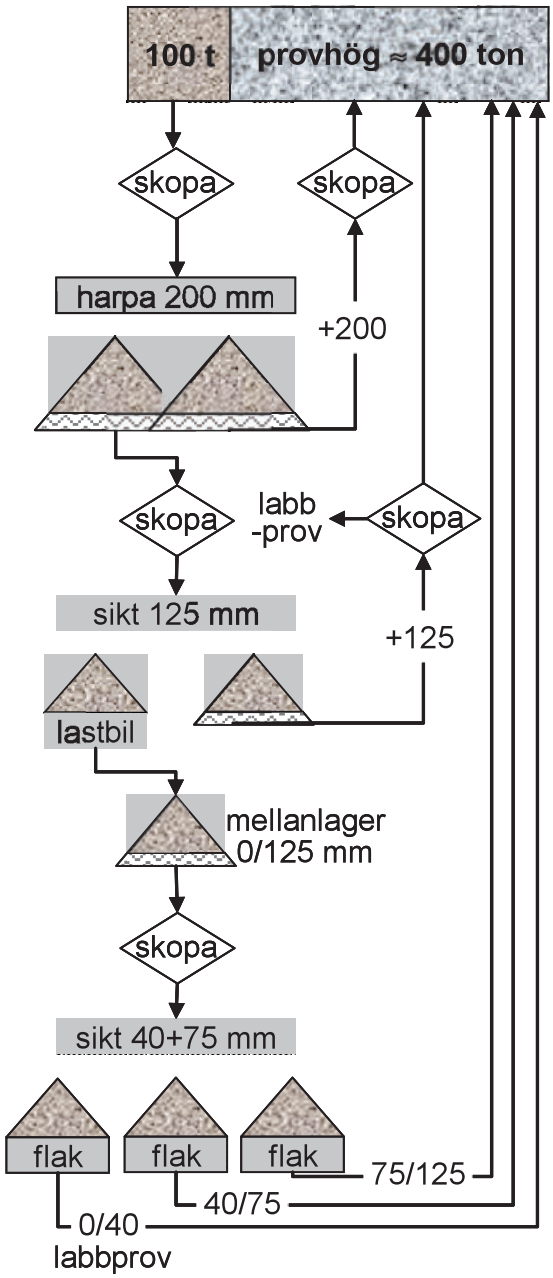
Figur 7: Omgrävda och homogeniserade provhögar 1A och 1B från salva 1.

Figur 8: Harpa (//200 mm) och verket Powerscreen Warrior 1800 (#125, 75 och 40 mm).

Under siktningsarbetet användes tre olika vågsystem i täkten; lastmaskinernas skopvågar, asfaltverkets bilvåg samt förkrossens bandvågar. Bilvågen var nykalibrerad och den mest använda skopvågen kalibrerades mot den. När möjligt vägdes alla massor som hanterades före och efter siktning, nedläggning i mellanlager osv. för att ha koll på ev. tillskott eller förluster.

På krossmotorn och på bandmotorerna efter förkrossen hade effektmätningsutrustning från Sandvik installerats. Förkrossen med de olika banden visas i Figur 10. Bandmotoreffekten kunde räknas om till lyftarbete och därmed till massflöde. Dessa data kunde jämföras med bandvågsdata [8].

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 9: Flödesschema för siktningskampanjen i Långåsen.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Figur 10: Placeringen av effektregistreringsutrustningen på förkross och efterföljande bandmotorer (') samt röd container med kopplingsskåp och mätare t.v. under förkrossen.

Utöver detta gjordes labbsiktning av prover från provhögarna hos NCC:s Väglaboratorium där också densitet, LA-tal och kulkvarnsvärde bestämdes på utvalda provhögar från salva 3 och 4. Dessutom bestämdes för granodioriten P-vågshastighet och slagbrotthållfasthet med s.k. split-Hopkinson-metod [8].

Valda försöksresultat

Arbetet i Långåsen med 0-salvan och de fyra MinBaS-salvorna har genererat stora mängder data som analyserats. I vissa detaljer är de inte färdiganalyserade. Alla data utom dem från den kontinuerliga effektmätningen redovisas i slutrapporten [8] men bara valda delar i detta bidrag.

Det dagliga arbetet i täkten är inte anpassat till en så detaljerad uppföljning som gjorts i projektet. Det är inte ekonomiskt motiverat. Det finns flera system för mätning och registrering av olika storheter men de är inte anpassade för att lätt ge en helhetsbild av arbetet. T.ex. används inte samma hålnumrering vid borrning och laddning. Visualiseringen, dvs. åskådliggörandet av hålinmätningen kunde vara betydligt bättre och kompatibel med borriggens GPS-mätsystem osv. Rutiner för lagring av data har inte alltid fungerat så data har förlorats. Vissa data lagras i skriftlig form, andra på datorer. Med tiden kommer naturligtvis detta att förbättras i takt med att mätning och visualisering av data automatiseras och standardiseras. Datahanteringen, dvs. systematisering, kontroll av datakvalitet och datavisualisering har därmed tagit en stor del av analysarbetet i projektet. Tabell 1 ger grunddata och Tabell 2 laddata för försökssalvorna.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 1: Grunddata för försökssalvorna i Långåsen.

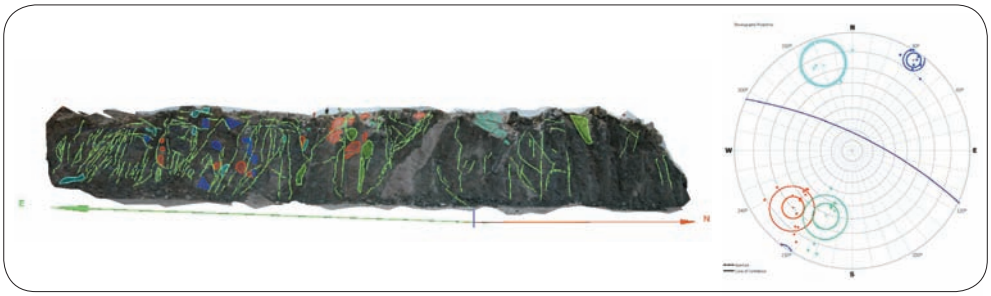
Salva	Borr-hål	För-sätt-ning	Hål-av-stånd	Borrat totalt	Medel-djup	Skjut-riktning	Pallhöjd medel	Av-laddning	Salv-volym	Salva massa
nr	*antal*	*m*	*m*	*m*	*m/hål*	*°*	*m*	*m*	*m³*	*ton*
0-EPD	123	2,6	3,4	1 471	12,0	318	10,5	1,6	11 373	30 138
0-N	104	2,6	3,4	1 110	10,7	240	9,2	1,6	8 433	22 348
1-N	52	2,6	3,4	947	18,2	24,1	16,7	1,6	7 682	20 357
1-H	68	2,2	2,9	980	14,4	24,1	12,9	1,5	5 602	14 844
2-H	60	2,2	2,9	1 092	18,2	24,1	16,7	1,8	6 393	16 941
2-N	45	2,6	3,4	700	15,6	24,1	14,1	1,8	5 591	14 817
3	96	2,6	3,4	1 700	17,7	24,1	16,2	1,7	13 755	36 451
4	96	2,6	3,4	1 730	18,0	24,1	16,5	1,8	14 020	37 154

Pallinmätning gjordes med stereofotometod och utvärderingsprogrammet SMX BlastMetrix. 3D-modeller av pallfronten skapades för de fyra MinBaS-salvorna och användes bl.a. för strukturkartering av fronterna, se Figur 11. Resultaten är goda avseende sprickorienteringen men det bedöms att bättre rutiner för att ta fram medelsprickavstånden behövs. Som det nu är skillnaderna mellan närstående pallpartier för stora.

Tabell 2: Laddata för försökssalvorna i Långåsen.

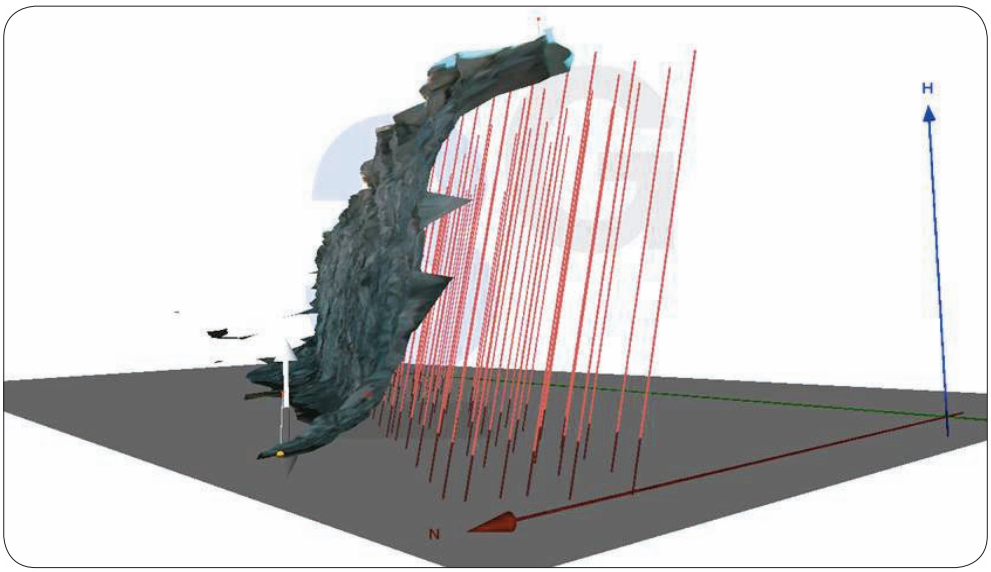
Salva	Bulk totalt	Laddat hål	Densitet	Primer	Primer	Booster	Booster
nr	*kg*	*antal*	*kg/m³*	*typ*	*kg*	*typ*	*kg*
0-EPD	9 511	123	1 200	Fordyn 55	250	Nobelit 55	120
0-N	5 891	104	1 004	Dyno P	104	Nobelit 55	120
1-N	5 334	52	993	Dyno P	52	Fordyn 50	60
1-H	6 146	68	1 125	Dyno P	68	Nobelit 50	80
2-H	7 014	60	1 146	Dyno P	60	Fordyn 50	60
2-N	2 894	45	752	Dyno P	45	Fordyn 50	45
3	9 960	94	1 064	Fordyn 60	200	Nobelit 50	150
4	11 181	96	1 154	Fordyn 55	58	Fordyn 55	98

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 11: Fronten på salva 1, del 1-H t.v. samt polplott för sprickytornas normaler.

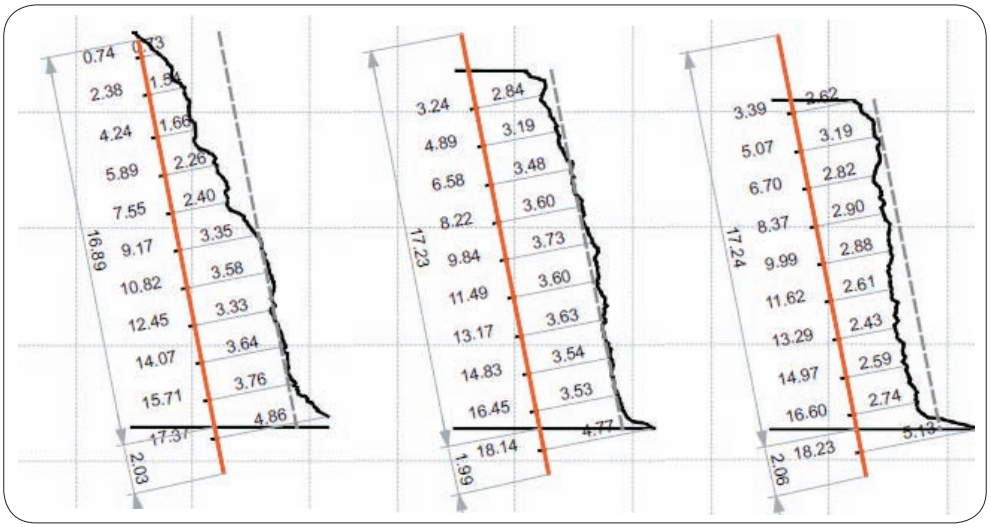
3D-modellerna för salva 3 och 4 kunde också sammanställas eller fasas ihop med påhuggs-, hålriktnings- och hållängdsdata från borriggen, se Figur 12. Denna ihopfasning komplicerades av osäkerheten ovanför vilket hål (nr enligt rigg) som ena skalstaken sattes vid fotograferingen. Om modellens läge i täktens koordinatsystem bestämts med oberoende inmätning hade detta problem kunnat undvikas.



Figur 12: Frontvy och sidovy från pallens högra sida över salva 4.

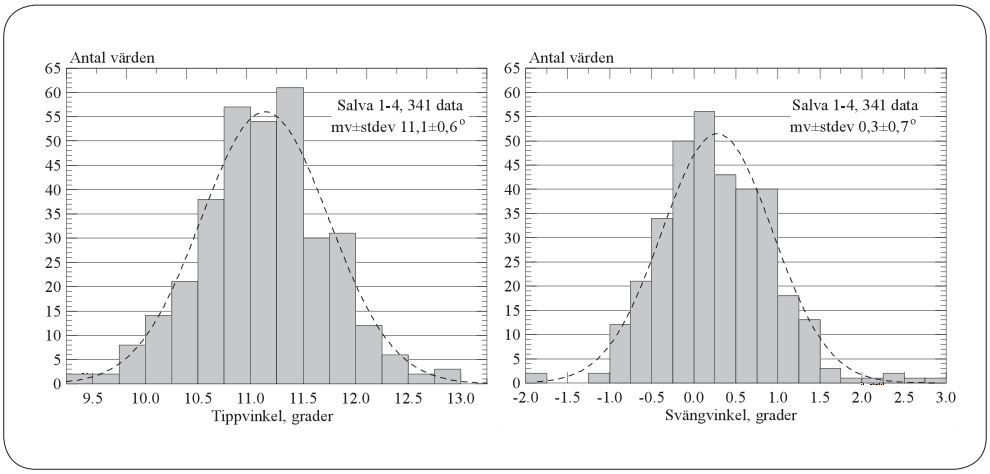
Sedan kunde i alla fall den teoretiska försättningen för hålen i salvornas första rad beräknas och åskådliggöras på cm/dm-nivå, se Figur 13. Detta är mycket noggrannare än nuvarande metod med handhållen laser som läser av försättningsprofilen med ca 1 m mellanrum. När hålinmätningen görs kompatibel med riggdata kommer motsvarande data för den verkliga försättningen lätt att kunna beräknas och åskådliggöras direkt.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 13: Försättningsprofiler för hål 4, 9 och 13 i rad 1 i salva 3.

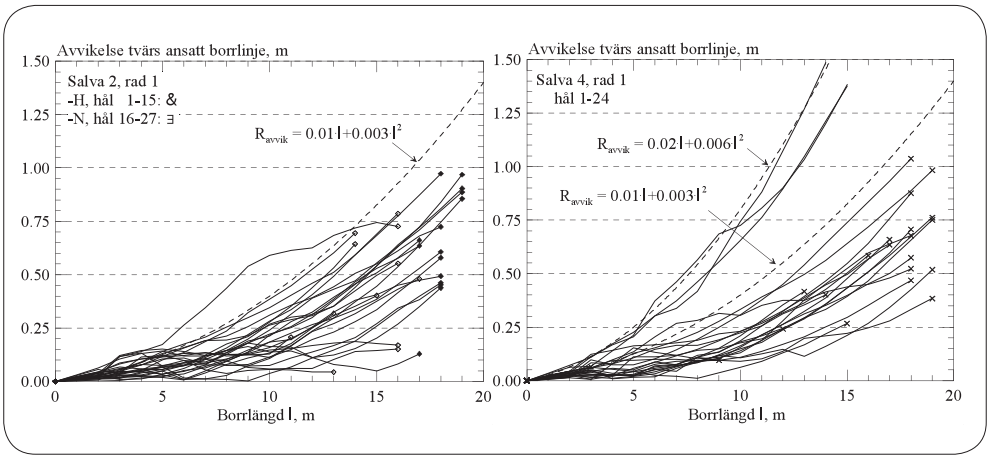
Felborrningsdata har analyserats i detalj. En toppmodern ny borrigg, Atlas Copco SmartRig D9C med GPS-baserat hålnavigeringssystem användes. Påhuggs- och hålriktningsvärden blev i allmänhet mycket noggranna och hålriktningsvärdena stämmer mycket väl med dem som erhölls vid felborrningsmätningarna. Enligt riggen ligger medelvärdena på tipp- och svängvinkeln inom ca 0,1° från inställda värden på 11,2 respektive 0° med en standardavvikelse på 0,3–0,4° för de enskilda salvorna. Riktningsvärdena från felborrningsmätningarna sprider något mer och svängvinkelvärden ligger av okänd anledning i medel ca 0,3° mer åt höger.



Figur 14: Histogram över tipp- och svängvinkeldata för påhugg, från felborrningsmätningar.

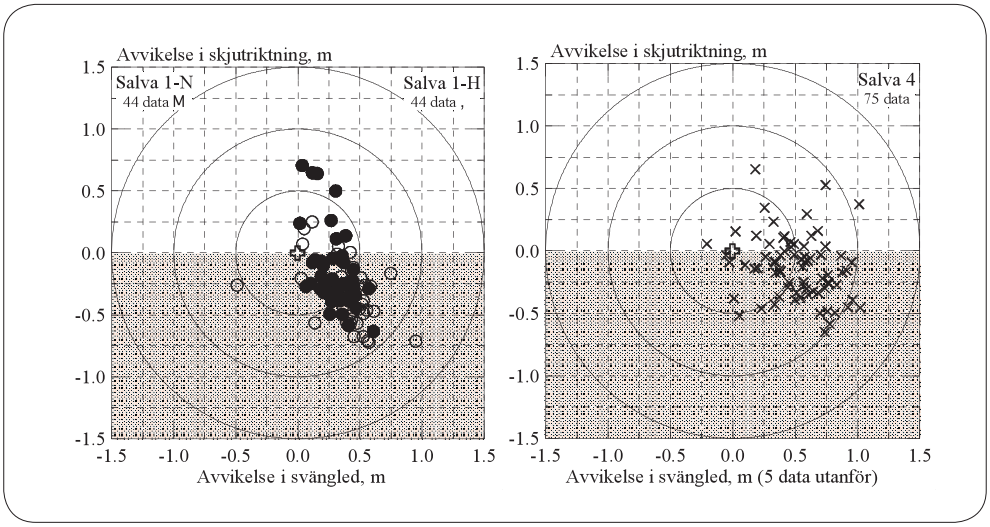
© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

En statistisk analys visar att det kan skilja i medel upp till ca 1° mellan de olika salvdelarnas hålriktningsvärden och att det ibland finns tydliga skillnader mellan hålen i de olika raderna. Variationerna i hålriktning torde emellertid ha liten praktisk betydelse för sprängningsresultatet. Vid borrhålsbotten, vid borrlängden 17–19 m, dominerar böjningsfelet stort, se Figur 15.



Figur 15: Böjningsfel i salva 1 och 4, dvs. radiellt avstånd från planerat hålläge.

Träffbildsdiagram visar att det är en systematisk skillnad mellan de fyra salvorna, se Figur 16. I medel hamnar borrhålsbottnarna 25 cm innanför den planerade borrlinjen och 50 cm till höger om den.



Figur 16: Träffbildsdiagram för hålbottnarna i salva 1 och 4

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

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

MWD-mätningarna från borriggen började för sent för att ge praktiskt värdefulla resultat. Endast borrsjunkningsdata för salva 3 och 4 kunde användas. Varken den matningstrycknormerade borrsjunkningen Hard, som är den bästa mätaren på bergets borrbarhet, eller den vridmotortryckbaserade storheten Frac, som är ett mått på bergets sprickighet kunde användas.

Den hålvisa laddningsuppföljning av mängd och laddad längd som gjordes gav delvis andra resultat än den salvvisa i Tabell 2 där laddpersonalen antecknat indelningen i salvdelar i laddjournalen. Tabell 3 ger data från den hålvisa uppföljningen och en jämförelsesiffra för den salvvisa. På vissa laddtruckar finns möjlighet att automatiskt registrera laddad mängd i varje hål och det bör utnyttjas, särskilt i den första hålraden.

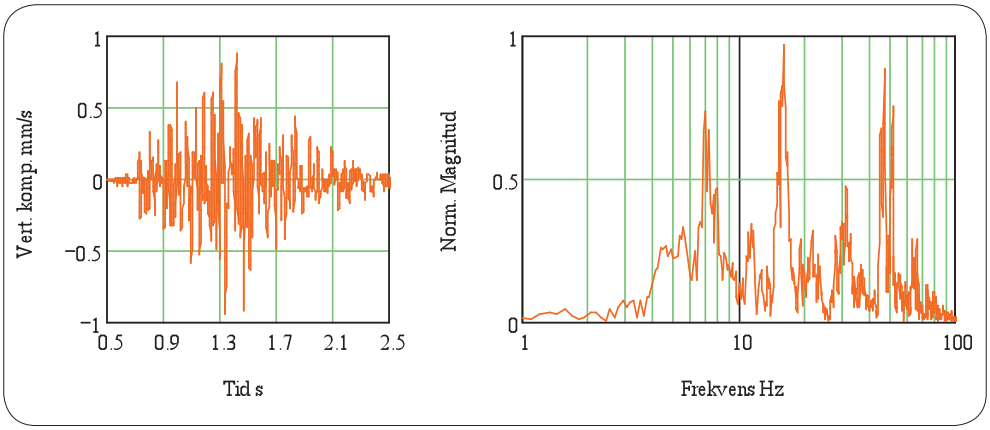
Tabell 3: Laddata baserat på antecknade mängder per hål.

Salva	Bulk hålvis	Laddat antal	Laddning per hål	Medeldjup	Avladdning.	Laddningskoncentration hålvis	Laddningskoncentration salvvisa	Specifik laddning
nr	*kg*	*hål*	*kg*	*m/hål*	*m*	*kg/m*	*kg/m*	*kg/m^3*
1-N	5 473	52	105	18,2	1,6	6,34	6,18	0,73
1-H	5 652	67	84	14,4	1,5	6,53	7,00	1,04
2-H	5 979	60	100	18,2	1,8	6,08	7,13	0,95
2-N	3 903	45	87	15,6	1,8	6,31	4,68	0,71
3	10 031	96	104	17,7	1,7	6,53	6,62	0,75
4	11 005	95	116	18,0	1,8	7,14	7,18	0,80

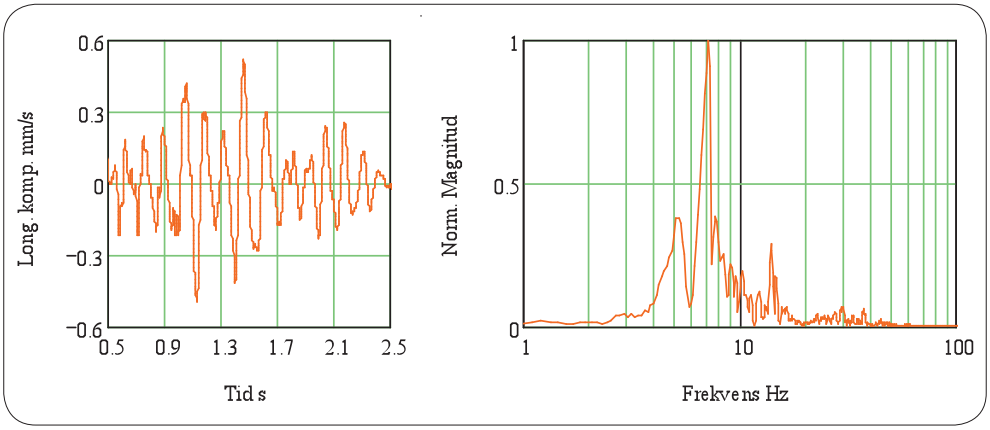
MinBaS-salvorna laddades i huvudsak enligt plan. Salvorna gick ut bra. Hörnet närmast krossen där upptändningen gjordes var oftast uppsprucket och laddades då inte så hårt med mindre kast och skut som följd just där. Styckefallet var okulärt sett relativt jämnt med grova stenar i toppen på elektroniksalvorna. Skutandelen uppskattas vara mellan 3–7 % men mättes annars inte. Flera VOD-mätningar gav av olika skäl inga data, de två värden som erhölls låg på 5050 och 5170 m/s, vilket är normalt för Titan 6075 som användes i salva 3.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Markvibrationer och luftstötvåg mättes vid vågen i täkten (300–400 m) och utanför den på vågkontoret vid infarten (1,7 km) och vid Arlandas brandstation (3,3 km). I vibrationssignalerna syns inga pulser från enskilda spränghål och det finns inget direkt samband mellan signalernas och salvornas varaktighet. Ofta finns i vibrationernas amplitudspektra toppar inom 5–10 Hz som torde härröra från objektens egensvängningar. Radfördröjningen 67 ms motsvarar 15 Hz och den frekvensen och dess övertoner finns i vissa av signalerna. Se Figur 17a–b.



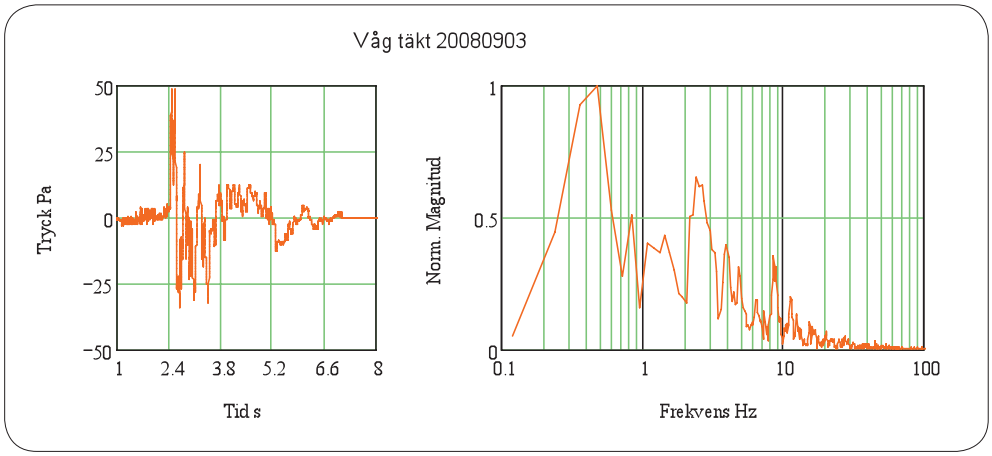
Figur 17a: Vibrationer och frekvensspektra från salva 3, brandstation.



Figur 17b: Vibrationer och frekvensspektra från salva 3, vågstation infart.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

De kortare fördröjningarna i raden motsvarar frekvenserna 40, 100 och 200 Hz och syns knappast i spektra. Vibrationsamplituderna utanför täkten ligger inom 0,4–1,1 mm/s vilket motsvarar måttlig störning och ligger knappt utanför de för Långåsen satta riktvärdena 1,0 mm/s. På vågstationen i täkten uppmättes som mest 9,2 mm/s i vertikalled för salva 4. Detta är mycket lägre än riktvärden för vibrationer för att undvika skador i industribyggnader.Luftstötvågorna har lägre frekvensinnehåll och en trycktopp i början av signalen, se Figur 18.



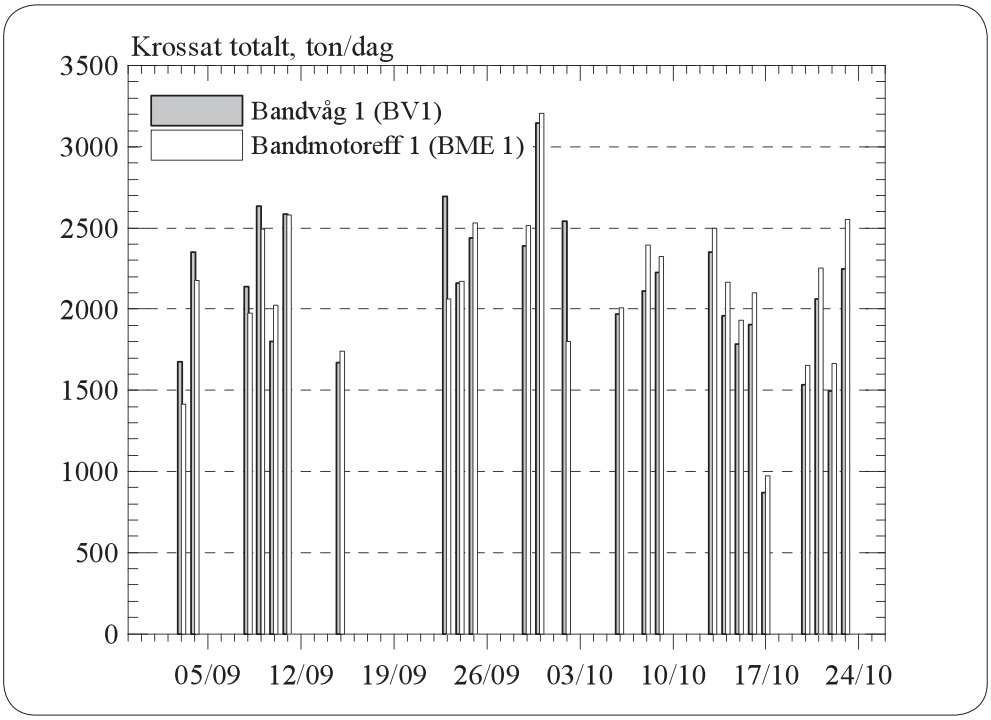
Figur 18: Luftstötvåg och frekvensspektrum från salva 3, våg i täkten.

Stötvågorna 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. Täktens riktvärde ligger på 500 Pa. För vågen i täkten anländer luftstötvågen innan markvibrationerna dämpats ut. Maxvärdet 100 Pa ligger under riktvärdet 500 Pa för undvikande av skada.

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

De vågsystem som används i täkten, skopvågar på lastmaskiner och vågen för färdiga produkter i asfaltverket visar i praktiken samma värden. Bandvågarna i krossverket verkar ligga systematiskt 1–2 % högre. Under projektet installerades också bandmotoreffektmätare för att mäta bandflöden. Installationen försenades tyvärr så att bara salva 3 och 4 kunde följas upp. Figur 19 visar jämförande tidsserier.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 19: Jämförande tidsserie för bandvåg och bandeffektmätare, ton/dag totalt.

Effektmätare är betydligt billigare än bandvågar men de hade i Långåsen en tidsberoende felvisning. Mätdata från effektmätningarna loggades på en PC och vid några tillfällen föll den dessutom ur. Dataserierna har sedan processats manuellt på PC. När loggningssäkerheten ökat och processningen automatiserats kommer tekniken säkert att kunna komplettera bandvågarna. Fler mätpunkter i verket ger också möjlighet att peka ut maskiner som börjar haverera.

Bandvågsdata för krossning av salvhögarna ger ett medelflöde av 315±35 ton/tim. Skillnaderna mellan salvorna är inte märkbart olika men på gränsen att kunna tolkas som det. Inte heller dieselåtgången (0,21 ± 0,04 liter/ton) skiljer sig märkbart mellan salvorna 1–4. Den högre förbrukningen för lastningen av 0-salvan kan delvis förklaras med längre körväg.

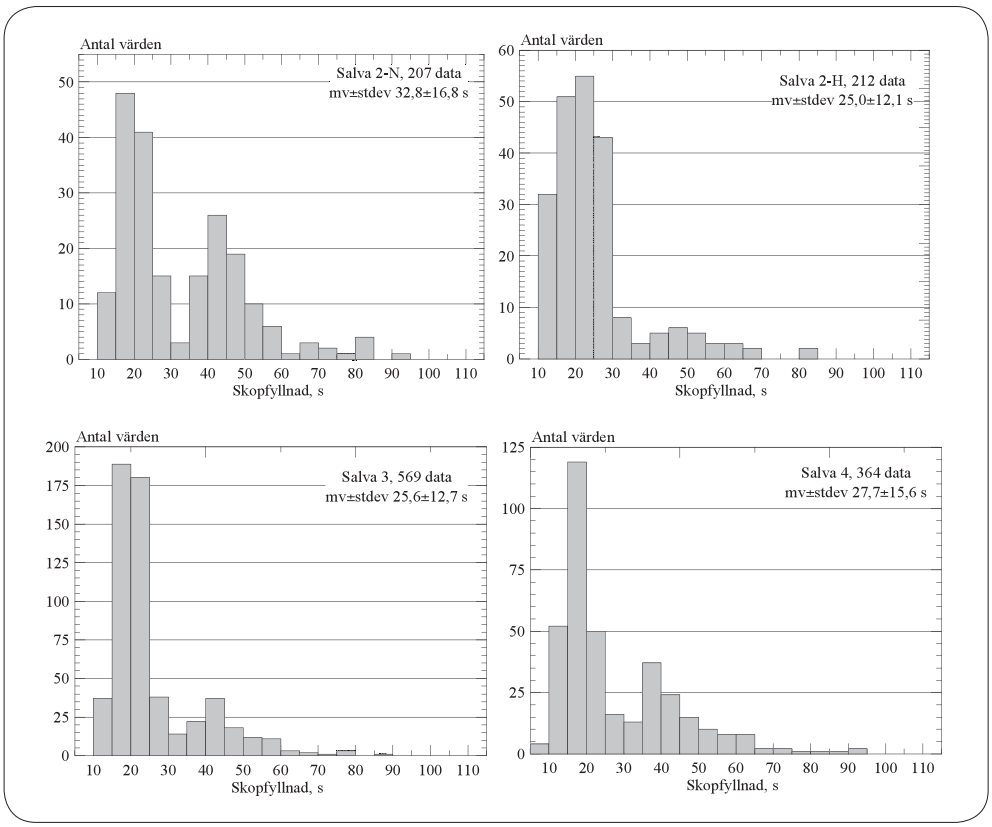
Samtidigt med bandmotoreffektmätare installerades en kontinuerlig effektmätning på förkrossen. När tomgångseffekt och stillestånd dras ifrån erhålls nettovärden på krosseffekten. Under en period av 25 dagar kunde motoreffektvärdena jämföras med de traditionella bandvågsvärdena. Dataserier för ton/dag krossat totalt, se Figur 19, och ton/dag krossat finmaterial följer varandra väl utom två dagar då effektregistreringen inte fungerat.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Det finns svårförklarade tidstrender i mätvärdena för krossmedeleffekt som troligen har mer med bergets geologi att göra än med hur hårt berget sprängts. Det hade varit bra om motsvarande tidsserier för Nonel-salvorna 1 och 2 hade kunnat registreras.

Lastcykeltiderna klockades manuellt med två stoppur och användning av mellantider. Det kräver alltså närvaro av två personer, en vid salvhög och en vid kross. I början provades videofilmning med senare klockning men metoden var inte lika precis och det är svårt att i efterhand bedöma onormala händelser eller vad som sker när lastmaskinen åker ur bildfältet. Därför övergavs metoden.

Det visar sig att höjd specifik laddning eller elektronikupptändning ger skopfyllnad med färre omtag jämfört med en normal Nonel-upptänd salva, se Figur 20. 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. Det stora antalet skopor i en salva (ca 5 000) eller under ett år (ca 50–100 000) ger ett visst ekonomiskt utslag. Skopfyllnadstiden minskar också för elektroniksalvorna. Andelen skopfyllnader utan omtag ligger på 70–80% och tidsvinsten är något mindre än för den högre specifika laddningen för Nonel-salvorna, ca 8 sek.



Figur 20: Skopfyllnadstider för salva 2, 3 och 4.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Skillnaden i körhastighet med fylld och tom skopa ger utslag i körtider till och från kross med ca 10 sek. Skillnaden i avstånd från olika salvdelar till krossen ger också utslag i körtiderna på 2–6 sek. För den enskilda lastcykeln drunknar dessa skillnader lätt i variationer i väntetid vid kross och andra mer eller mindre slumpmässiga faktorer.

Enligt planen skulle var 25:e skopa vid utlastning läggas i provhögar för styckefallsmätning men precis som förut visade det sig lättare för lastaren att göra uttaget när krossen stod eller dess ficka var full. Styckefallet mättes dels genom siktning av provhögarna inom området 40/200 mm med ett mobilt sorteringsverk, dels med en digital metod (Split Desktop) från foton på salvhögen och på provhögarnas ovan- och sidoytor. Båda metoderna är tids- och kostnadskrävande men siktningen av provhögarna ger ett betydligt tillförlitligare resultat.

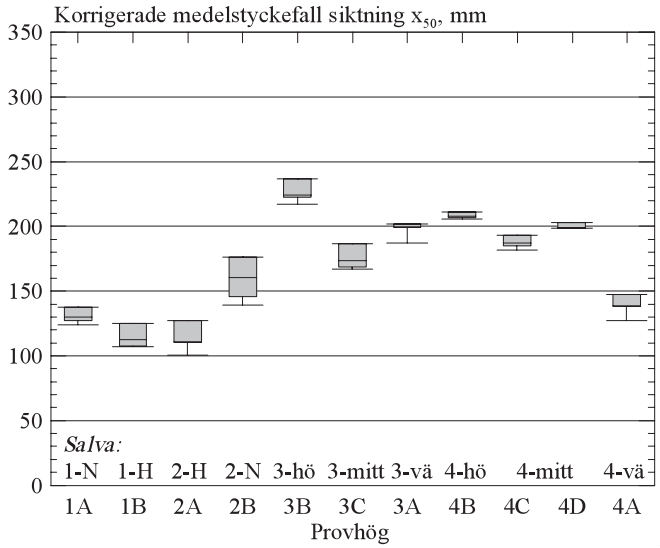
Elva provhögar om ca 400 ton lades upp för de fyra MinBaS-salvorna. Av dessa siktades ca 100 ton från varje i täkten. Hanteringen av massorna vid sorteringsarbetet gav såväl förluster som tillskott av material. Det hade naturligtvis varit bättre med ett hårdgjort underlag för sorteringsarbetet. Felanalysen visar att inverkan varit förhållandevis liten och med säkerhet mindre än osäkerheten i bildanalysvärdena. Data ges i Tabell 4 och i Figur 21.

Tabell 4: Medelstyckefall x_{50} i mm beräknat på vägda och korrigerade fraktioner.

Provhög	1A	1B	2A	2B	3B	3C	3A	3A–3C	4B	4C	4D	4A	4B–4D
Salva	1-N	1-H	2-H	2-N	3	3	3	3	4	4	4	4	4
Lastning	hö	vä	hö	vä	hö	mitt	vä	hela	hö	mitt	mitt	vä	ej pegm.
Vägt	127	113	110	160	217	169	187	190	211	182	199	139	195
Korr 1–4	131 ±6	114 ±9	114 ±11	159 ±19	229 ±7	177 ±9	200 ±1	202 ±6	207 ±1	189 ±4	201 ±2	139 ±9	198 ±1

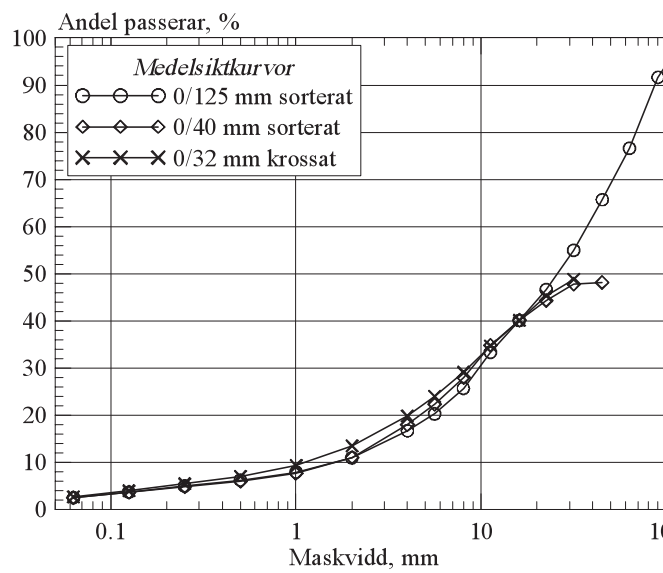
Tabellen visar tydligt att de två ursprungsfaktorerna specifik laddning och upptändning gett stort utslag på styckefallet i provhögarna. En högre specifik laddning ger finare styckefall vid Nonel-upptändning, jfr de korrigerade värdena $x_{50} = 114$ mm för salvdelarna 1-H och 2-H med värdena 131 och 159 mm, i snitt 145 mm för salvdelarna 1-N och 2-N. Effekten av elektronikupptändningen är förvånansvärt nog ett betydligt grövre styckefall, jämför 145 mm med värdena för provhögarna 3A–3C och 4B–4D som är $x_{50} = 202$ och 198 mm, i snitt 200 mm.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 21: Variationer i korrigerade medelstyckefall från siktning av provhögar.

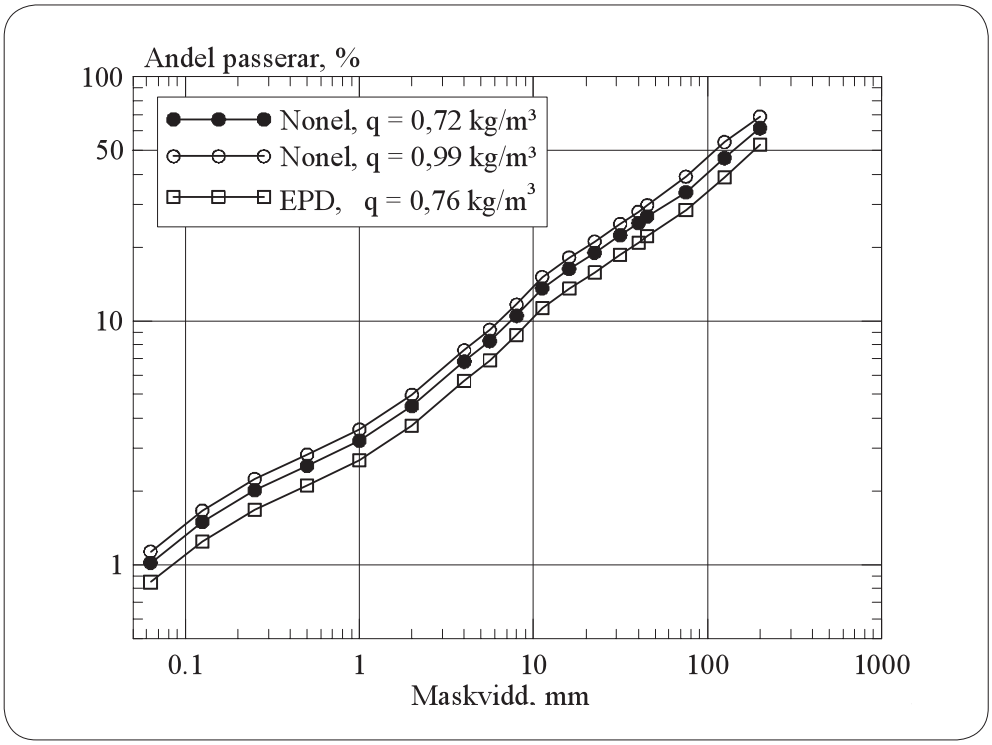
Alla övriga data för berget och sprängningarna som samlats in och på förhand bedömts kunna inverka på sprängningsresultatet har haft en betydligt mindre inverkan på styckefallet. Från varje provhög togs också prov för labbsiktning, före krossning 0/125 och 0/45 mm och 0/32 mm efter förkrossen. Se Figur 22.



Figur 22: Jämförelse av medelkurvor för labbsiktat material i lin-log skala.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Inom området 0/16 mm är medelkurvorna för de olika provtyperna väsentligen lika och underfraktionen 0/45 mm ur kurvan för 0/125 mm kunde därför användas för att skarva på provhögarnas siktdata så att hela siktkurvor kunde skapas, se Figur 23.



Figur 23: Skarvade styckefallsfördelningar för berget i provhögarna på Långåsen.

Krossningen av provhögarna följdes upp med samma metoder som för elektroniksalvorna 3 och 4. Totalt krossades ca 4600 ton under fyra dagar. Krossen arbetade satsvis i ganska korta cykler där varje cykel producerade i medel drygt 22 ton, dvs. knappt tre skopor från lastmaskinen. Alla provhögarna utom hög 4A gav nära nog 1/3 finmaterial 0/32 mm ut från förkross oavsett medelstyckfallet på inmatat berg. Hög 4A, som innehöll mycket pegmatit gav nästan 37 % finmaterial efter krossning. Resultaten ges i Tabell 5 och Figur 24 och 25.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

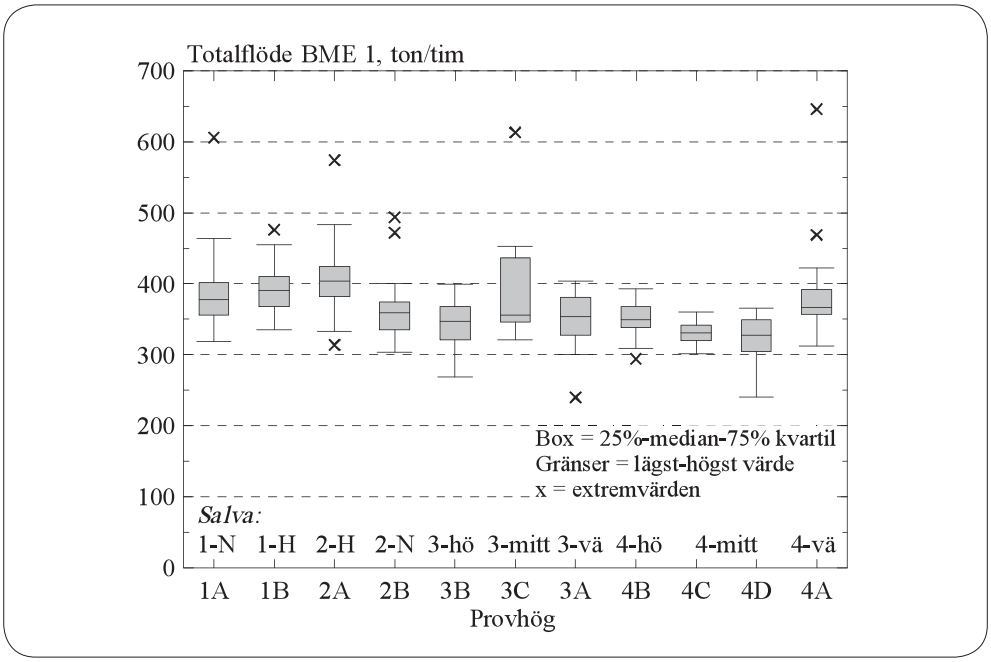
Tabell 5: Krossningsförlopp för provhögarna samt deras massor.

Prov-hög	Antal cykler	Nytt-jande-grad	Effektiv kross-tid	BME1 cykel	BME1 medel	Band-våg 1	BME1 -BV1	Kapa-citet	Grovt +32 mm	Andel grovt	Medel-effekt
	st	*%*	*min*	*ton*	*ton*	*ton*	*%*	*ton/ tim*	*ton /tim*	*%*	*kWh/ ton*
1A	28	24,1	62,2	392,3	401,6	396,5	-1,1	378,6	266,3	70,3	0,282
1B	17	75,0	67,2	431,6	439,7	440,4	-2,0	385,4	274,9	71,3	0,259
2A	29	31,1	71,7	489,9	486,6	471,2	4,0	410,0	280,7	68,5	0,237
2B	15	44,1	73,3	460,8	450,0	429,7	7,2	377,0	262,0	69,5	0,308
3A	27	60,8	73,8	441,4	427,0	435,9	1,3	358,8	255,4	71,2	0,320
3B	15	81,3	74,1	442,8	426,1	416,4	6,3	358,7	243,8	68,0	0,327
3C	13	77,9	68,0	406,0	438,4	410,8	-1,2	358,2	250,6	70,0	0,361
4A	19	79,2	69,1	426,4	444,7	396,0	7,7	370,4	236,6	63,9	0,306
4B	12	52,1	61,9	367,7	359,6	374,9	-1,9	356,2	247,7	69,5	0,383
4D	25	76,4	72,2	408,7	386,0	371,6	10,0	339,8	238,9	70,3	0,356
4C	12	80,7	78,9	455,8	443,2	441,8	3,2	346,8	245,5	70,8	0,364
Totalt				4 723	4 703	4 585	3,0	367 ±20	255 ±15	69 ±2	0,32 ±0,05

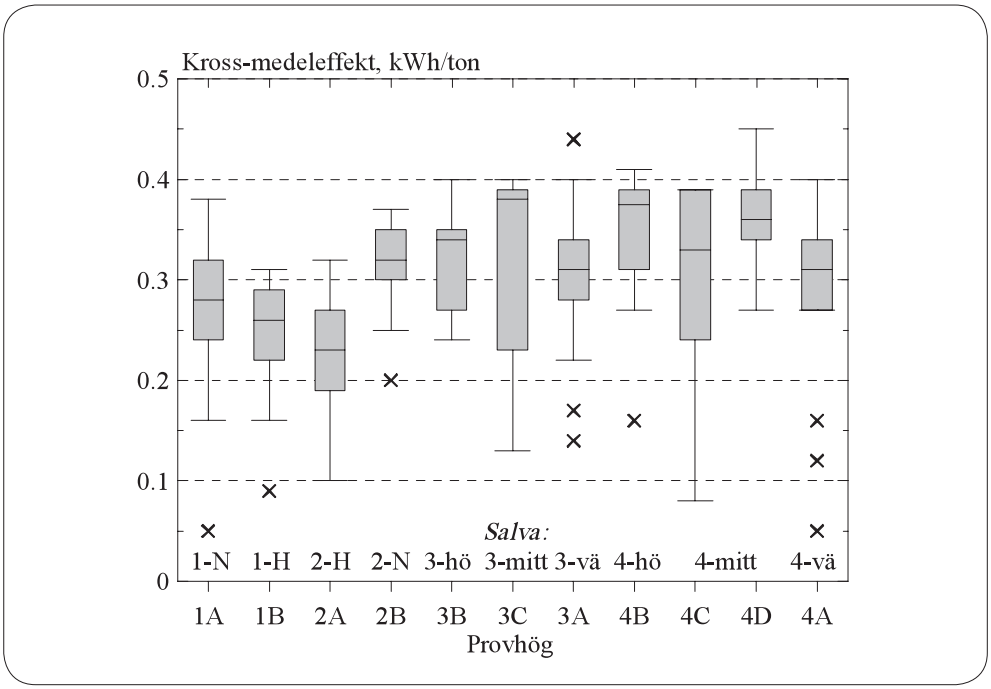
Okänsligheten för storleken på ingående sten kan förklaras av att krossen när den arbetat satsvis mest krossat en sten i taget, s.k. ”single particle breakage” och att krossning och sprängning verkar ge lika mycket relativ finandel vid sönderbrytningen.

Mängden totalt krossat material kan beräknas på två olika sätt som ger olika resultat. Det korrekta sättet är att multiplicera flödet (ton/tim) under varje krosscykel med cykeltiden. Om man i stället multiplicerar medelkapaciteten för hela provhögen med det totalt effektiva krossningstiden så kan skillnaden bli så stor som 10 %. Jämför kolumnerna BME1-cykel och BME1-medel i Tabell 5. När krossen arbetade producerade den i medel 350–400 ton/tim.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 24: Låddiagram för effektiva produktflödet genom förkrossen, dvs. när den arbetar.



Figur 25: Låddiagram över den specifika medeleffektåtgången för provhögarna.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 6 ger medelvärden från krossningen av provhögarna beräknade för Nonelsalva med normal och hög specifik laddning samt för sammanlagda elektroniksalvor.

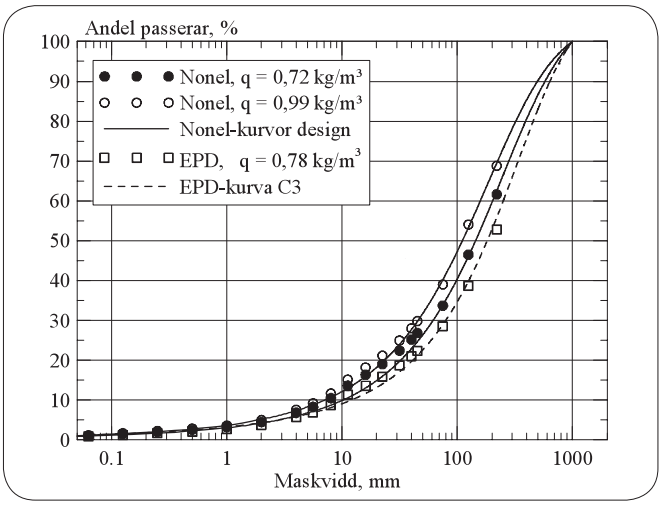
Tabell 6: Kapacitets- och effektdata från krossningen av provhögarna.

Salva	Nonel *0,72 kg/m³*	Nonel *0,99 kg/m³*	EPD *0,75 kg/m³*	EPD *0,80 kg/m³*	EPD *pegmatit*	EPD *0,78 kg/m³*
Salvdelar	1-N + 2-N	1-H + 2-H	3A-3C	4A-4D	4A	3-4 ej 4A
ton/tim	378	398	359	353	370	353
kWh/ton	0,296	0,248	0,335	0,351	0,306	0,351

Högst krossflöde och lägst specifikt energibehov (kross-medeleffekt, kWh/ton) erhölls för provhögarna från Nonel-salvorna med hög specifik laddning. Förklaringen är att inmatat material har mindre mängd stora stenar och att materialet passerar krossen snabbare. Den hårdare sprängningen verkar ha ökat krossflödet med 5 % och sänkt energibehovet med 16%. Det grövre styckefallet i salva 3 och 4 verkar på samma sätt ha sänkt krossflödet med 7% och höjt energibehovet 19 %.

Designformler

Provhögarnas siktkurvor ges med mycket god noggrannhet av Swebrec-funktioner som trunkerats för att ta hänsyn till den andel skut i salvan som lagts åt sidan. Metodiken är inte perfekt eftersom en något för stor skutgräns om 900–1 000 mm måst användas. Sammanvägda siktkurvor för provhögarna från de tre salvtyperna har räknats om mht skutandelen och salvornas siktkurvor ges i Figur 26. Motsvarande medelstyckefall för salvorna uppskattas vara x_{50} = 162,5 mm för en Nonelsalva med specifik laddning 0,72 kg/m³, 119,4 mm för en med 0,99 kg/m³ och 204,3 mm för elektroniksalvorna med 0,78 kg/m³ oavsett om fördröjningen är 5 eller 10 ms.



Figur 26: Styckefallskurvor för provhögar, data och bästa anpassade Swebrec-funktioner (F1, F2 och C3). Andelarna skut är 7 % (0,72 kg/m³), 4 % (0,99 kg/m³) och 5 % (0,78 kg/m³).

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Från siktkurvorna från salva 1 och 2, där Nonel-upptändning med olika specifik laddning använts har designformler tagits fram. Formlerna utgår från förhållandena i Långåsen och medger variation i pallhöjd, håldiameter, försättning (S/B ≈ 1,3), antal rader, sprängämne och bergförhållanden. Grundformlerna ger medelstyckefallet x_{50} (mm) uttryckt i specifikladdning q (kg/m³), viktstyrka s_{ANFO} (%) och laddningsvikt per hål Q (kg).

$$x_{50} = 10A \cdot Q^{1/6} \cdot (115/s_{ANFO})^{19/30}/q^{0,84}, \quad (1)$$

Här har exponenten för q-faktorn höjts från 0,8 till 0,84. Bergfaktorn A ges i sin tur av

$$A = 0,039 \cdot (RMD+RDI+HF). \quad (2)$$

Här ges bergmassetermen RMD (10–90) i bilagan, densitetstermen av RDI = 0,025·ρ(kg/m³)- 50. Hårdhetstermen ges av HF = E/3 om E < 50 eller UCS/5 om E > 50, beror av tryckhållfastheten UCS(MPa) eller E-modulen E(GPa).

Styckefallsfördelningen i termer av andelen P (%) som passerar en sikt med kvadratiskt nät ges i sin tur av

$$P(x) = 100/\{1+[\ln(x_{max}/x)/\ln(x_{max}/x_{50})]^b\}. \quad (3)$$

Utöver medelstyckefallet x_{50} ingår största sten xmax (mm) och kurvans krökningsexponent b som för Nonel-salvorna i Långåsen antar värdet b = 4,17. x_{max} beräknas ur följande ekvationer där försättningen B (m) och lutningen s_{50} (1/mm) på siktkurvan vid x_{50} ingår, [8] ekv. 6.8,

$$s_{50} \cdot x_{50salva}^{0,75} = 0,2 \cdot (0,0415/B)^{0,25} \text{ med } s_{50} = b/[4x_{50salva} \times \ln(x_{max}/x_{50})]. \quad (4)$$

Utgångspunkten för användningen av designformlerna är förhållandena för Nonel-salvorna, se Tabell 7. Sprängämnet antas vara bulkemulsionen Titan 6080 med s_{ANFO} = 93 %.

Tabell 7: Borr- och laddata för Nonel-salvor i Långåsen.

Granodiorit		**Pallhöjd H, m**	16,0	**Densitet, kg/m³**	1 100
Vertikalt sprucken		**Underborrn. UB, m**	1,5	**Laddkonc.Q', kg/m**	6,4
Slag ner ur front		**Hållutning, °**	11,2	**Laddning Q, kg/hål**	103
Densitet, kg/m³	2 677	**Oladdad del OL, m**	1,7	**Första rad S/B**	1,0
UCS, MPa	206	**Laddad längd L, m**	16,1	**Övriga rader S/B**	1,3
P-vågshast. m/s	5 275	**Håldiameter, mm**	86	**Antal rader**	4

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Används dessa data, geometriska förhållanden för borrplanen och formlerna 1–3 erhålls dels A = 4,56 samt värdena i Tabell 8 där utgångspunkten är ett borrhålsmönster med S/B ≈ 1,3. Notera att b = 4,17 enligt tidigare. I tabellen har andelen stenar större än 1 m i sida och andelen bärlagerfraktion i salvan också beräknats.

Tabell 8: Parametrar för designkurvor för Långåsen.

B	S	S/B	V_b	q	$x_{50salva}$	x_{max}	+1,0 m	-32 mm
m	*m*	-	*m^3/hål*	*kg/m^3*	*mm*	*mm*	*%*	*%*
2,0	2,6	1,30	89,4	1,15	109	7 644	4,4	25,8
2,1	2,7	1,29	97,2	1,06	117	8 016	5,0	24,7
2,2	2,9	1,32	110,2	0,94	130	8 374	5,7	23,0
2,3	3,0	1,30	118,8	0,87	139	8 748	6,3	22,1
2,4	3,1	1,29	127,7	0,81	147	9 123	6,9	21,2
2,5	3,3	1,32	142,6	0,72	162	9 491	7,8	19,9
2,6	3,4	1,31	152,3	0,68	171	9 868	8,4	19,1
2,7	3,5	1,30	162,4	0,64	180	10 245	9,1	18,5
2,8	3,6	1,29	172,8	0,60	190	10 623	9,8	17,8
2,9	3,8	1,31	190,0	0,54	206	11 003	10,8	16,8
3,0	3,9	1,30	201,2	0,51	216	11 383	11,5	16,3

Raderna med gråa fält ligger nära förhållandena i MinBaS-salvorna 1 och 2. Den specifika laddningen avviker något. Styckefallsvärdena i tabellen gäller salvan inklusive skut, andel Sk (%). För att beräkna styckefallet i en provhög utan skut används en trunkerad fördelning

$$P_{hög}(x) = P_{salva}(x)/[1\text{-}Sk/100] \text{ där } Sk = 100 \cdot [1\text{-}P_{salva}(x_{skut})] \text{ och } x \leq x_{skut} \qquad (4)$$

Medelstyckefallet $x_{50hög}$ i högen bestäms sen av att $P_{hög}(x_{50hög}) = 50\,\%$.

Värdena Sk i skutkolumnen i Tabell 8, som beräknats med $x_{skut} = 1000$ mm, är ett par procent för höga jämfört med de bedömningar om andelen som gjordes tidigare. Detta är ett resultat av kraven på att kurvans lutning s_{50} runt medelstyckefallet skall vara rättvisande. Det är svårt att med en ekvation med så få parametrar som ekv. 3 återge hela styckefallskurvan korrekt. Återgivningen torde vara god upp till ungefär P = 90 %.

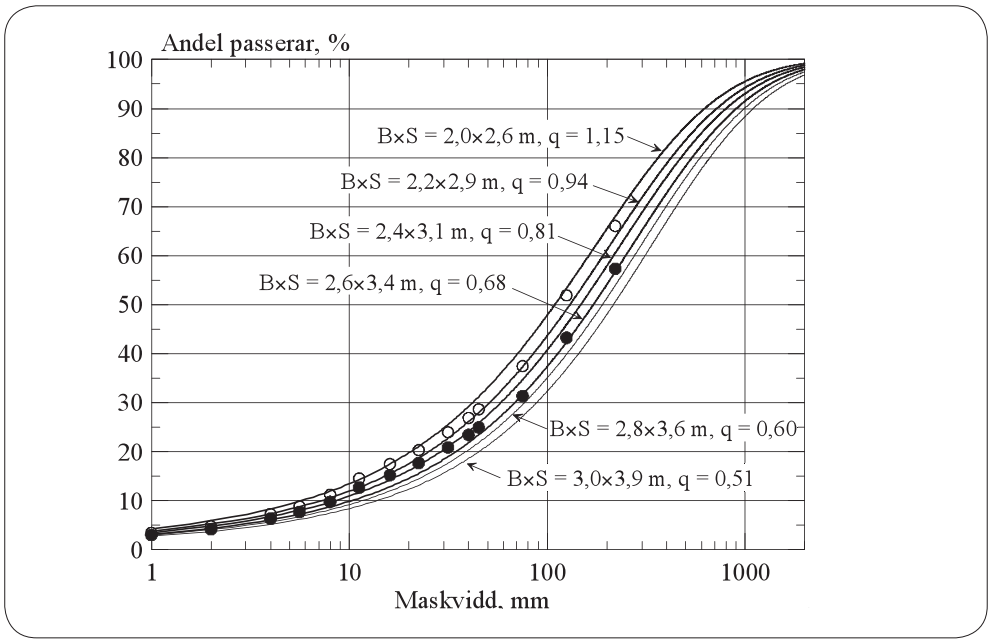
Svårigheterna med förutsägelser i skutområdet har påpekats förut [4]. Storlekarna för största sten i Tabell 8, $x_{max} \approx 7{,}6$–$11{,}4$ m, är naturligtvis praktiskt orimliga och skall betraktas som beräkningstekniska parametrar som behövs för att ge en bra styckefallskurva för stenar mindre än skutgränsen.

Som jämförelsevärden har även andelen bärlagermaterial -32 mm i salvorna lagts in i Tabell 8. Andelen bärlagermaterial i salvan är något större i Långåsen än den var i Vändle där värdet i salvan låg runt 15 %.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Alla beräkningsstegen bakom Tabell 7–8 finns i bilaga 19 i MinBaS-rapporten [8] och ges även i bilagan nedan. Det är med dem enkelt att göra en Excel-tabell för dem och även undersöka effekten av ändringar av olika parametervärden. Designkurvorna för Vändle (Ouchterlony m.fl. 2005) var mer begränsade eftersom de utgick från en serie värden för specifik laddning; q = 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, och 0,8 kg m^3. Det överläts åt användaren att själv beräkna q. Serien med q-värden i Tabell 8 är inte lika jämn men utgår från faktiska förhållanden.

För B-värden med jämna decimaler plottas styckefallskurvorna i Figur 27. Som synes faller det mätta omräknade styckefallet någorlunda väl på kurvorna för B·S = 2,2·2,9 respektive 2,6·3,4 m. Designformlerna för Långåsen är i och med detta mer praktiskt utformade än designkurvorna för Vändletäkten.



Figur 27: Designkurvor för Nonel-salvor i Långåsen.

Designformlerna ovan förutsätter att samma upptändning som under försöken används, dvs. Nonel med 2 hål på ett 25 ms intervall i raden och 67 ms mellan raderna. MinBaS-rappoten ger två exempel på förutsägelser m.h.a. designformlerna, effekten av ändrad avladdningslängd och slitna borrkronor. Välj t.ex. oladdad del = 2,5 m i stället för 1,7 m som i Tabell 7. För en salva med borrmönstret 2,6 · 3,4 m skulle den specifika laddningen sjunka från 0,68 till 0,64 kg/m^3. Medelstyckefallet $x_{50salva}$ skulle öka från 171 till 177 mm, dvs. med 3,5 %. Däremot skulle såväl skutandel som andel bärlager ändras mindre än 0,5 %-enheter. Detta stämmer väl med Lisleruds erfarenhet [12]. När oladdad längd blir för stor riskerar däremot andelen skut att

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors
öka kraftigt, något som formlerna är dåliga på att förutsäga. Tabell 7 utgår från att medelvärdet Ø86 mm gäller för en Ø89 mm krona som tas ur bruk när den slitits till Ø82 mm. För en salva med borrmönstret 2,6·3,4 m ger en ny krona en specifik laddning q om 0,73 kg/m^3 och en nersliten 0,60 kg/m^3. Medelstyckefallet $x_{50salva}$ skulle öka från 163 till 185 mm, dvs. med 13,5 %. Skutandelen skulle inte ändras nämnvärt men andelen bärlager skulle minska från 20 till 18 %.

Effekten av ändringar i bergart och bergstruktur kan bedömas mha ekv. 2 och RMD-ekvationerna i [8] eller i bilagan. I designformlerna kommer detta att uppträda som ett ändrat A-värde.

I en vidareutveckling av Kuz-Ram-modellen sammanfattar Cunningham [13] effekten fördröjning och tändspridning på styckefallet i pallsalvor. Han jämför t.ex. beräkningar för två likadana salvor, en skjuten med pyrotekniska kapslar med 25 ms fördröjning mellan hålen och en skjuten med elektronikkapslar med fördröjningen 9 ms. Tiderna är lämpligt lika de fördörjningar vi valt i Långåsen. Hans beräkningar visar att elektroniksalvan skall ge finare medelstyckefall (effekten av tändtiden) och brantare styckfallskurva (effekten av den betydligt mindre tändspridningen) än pyrotekniksalvan, alltså tvärtemot resultaten från Långåsen.

Den optimala fördröjningen [13] mellan hålen i en rad borde för Långåsen vara ca 3 ms/m försättning, dvs. 6,6–8,7 ms och alltså något kortare än de 2 hål per 25 ms som använts. Enligt detta synsätt borde elektroniksalvorna med 5 och 10 ms fördröjning i raden ge finare medelstyckefall. I Långåsen fick vi tvärtom ett grövre styckefall i elektroniksalvorna. Dessutom gav de tvärtemot modellen en flackare styckefallsfördelning [8].

Eftersom resultaten för elektroniksalvorna i Långåsen inte givit förväntat resultat så har resultatet från dem inte kunnat användas i designformlerna.

Diskussion och slutsatser

Avsikten var först också att i Långåsen testa betydligt kortare intervall i elektroniksalvor, ner till 1 ms mellan hålen i en rad och ev. även mellan raderna. Detta för att testa hypotesen att stötvågssamverkan kan ge ett betydligt finare styckefall än normalt. Hypotesen bygger på intressanta teorier men backas bara upp av ett trovärdigt rapporterat försök [10]. Vår farhåga för att samverkan mellan hålens luftstötvågor skulle ge en samfälld nivå som betydligt överskred tillåtna gränsvärden fick oss att börja med 10 och sen pröva 5 ms fördröjning.

När elektroniksalvorna visade sig ge ett betydligt grövre styckefall svalnade intresset. Dessutom har försök med olika fördröjningstider, som gjorts innan den storskaliga användningen av elektroniktändare började, visat samma sak.

Under analysarbetet har dessutom tillkommit simuleringar i Vinnova-projektet ”Bättre sprängningsresultat med precis upptändning” som också visar att mycket korta fördröjningar ger ett grövre styckefall, Hansson [14]. Det använda beräkningsprogrammet bedömdes dock av olika skäl inte hålla måttet och har bytts mot ny

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

programvara. Nya simuleringar skall förhoppningsvis visa vilken effekt tändfördröjningen har på styckefallet. Eftersom vi inte har några andra seriösa teorier om hur tändfördröjningen inverkar finns skäl att invänta dessa simuleringar innan försök med korta tändtider i en bergtäkt dras igång.

Med dessa reservationer har de två huvudmålsättningarna med MinBaS-projektet 1.2.1 Optimal fragmentering i sprängning II uppnåtts; en utvärdering av användning av elektroniksprängkapslar och en validering av designkurvorna från Vändle.

Styckefallet för Nonel-salvorna i Långåsen följer Kuz-Ram-modellen med Swebrec-fördelning utmärkt väl avseende inverkan av specifik laddning. Värdet på bergfaktorn A i modellen är rimligt, $A \approx 4{,}56$. Samma metodik som i Vändle-fallet har i huvudsak använts för att göra designformlerna. En skillnad är att vi nu tagit hänsyn till att skuten i salvan inte följer med till provhögarna. En annan skillnad är att nyutvecklad teori [15] använts för att beräkna x_{max}-värdena.

Designformlerna för Långåsen har också gjorts mer praktiska genom att de utgår från en håldiameter i salvan, i genomsnitt Ø86 mm, och andra data för borrplanen, främst hålmönstret B·S. Ur dessa data beräknas den specifika laddningen med formlerna i bilagan. Härigenom kan effekten av olika förändringar i borrplanen lättare studeras.

Designformlerna kan inte utan vidare överföras till andra geologiska förhållanden. Bergartens och bergmassans egenskaper ingår visserligen i beräkningen av bergfaktorn A, se ekv. 2 och bilagan, men kalibreringen har gett olika numeriska värden på konstanten. För Långåsen erhöll vi värdet 0,039 och för Vändle [1] värdet 0,05. Det betyder att formlerna inte fångar upp alla egenskaper hos berget på rätt sätt, eller möjligen att de egenskaper som bestämmer A är felaktigt mätta eller bedömda.

Resultaten för elektroniksalvorna, som hade nästan samma borr- och laddplan som Nonel-salvdelarna med normal specifik laddning, visar att tändfördröjningen och ev. tändspridningen kan ha en avsevärd inverkan på styckefallet. Olika tändfördröjning och tändplan med Nonel kan också ge olika resultat. Cunningham [13] inför t.ex. faktorn A_t framför A i ekv. 2 för att ta hänsyn till upptändningen. Värdet på A_t är så att säga inbakat i A-värdena för Vändle och Långåsen.

Om designformlerna tillämpas på en ny täkt med andra geologiska förhållanden kan de följaktligen bara ge en uppfattning om relativa förändringar i styckefallet när borr- och laddplanen ändras med fasthållen tändplan. Användningen av elektronikkapslarna gav flera oväntade resultat. De kan kort sammanfattas som att jämfört med Nonel-salvor med något lägre specifikladdning erhölls:

- ett märkbart grövre medelstyckfall i salvorna, en uppgång från ca 160 till 200 mm,
- en märkbart kortare skopfyllnadstid, en minskning med drygt 9 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.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Vi måste göra den reservationen att vi inte vet vad effekten skulle bli om elektroniktändarna användes för att i) åstadkomma en samtidig botten- och topptändning, ii) minska fördröjningen i raden till kortast möjliga tid idag, 1 ms, eller iii) minska fördröjningen mellan raderna till betydligt kortare tid än 67 ms. Det kan inte uteslutas att ett något finare styckefall än i salva 3 och 4 skulle erhållas.

Motsvarande inverkan av Nonel-upptändning med högre specifik laddning, 0,99 jämfört med 0,72 kg/m^3, blev:

- ett märkbart finare medelstyckfall i salvorna, en minskning från ca 160 till 120 mm,
- en märkbart kortare skopfyllnadstid, en minskning med knappt 9 sek från ca 35 sek,
- ett märkbart högre flöde genom krossen, ca 5 % ökning från 380 till 400 ton/tim
- ett lägre energibehov vid krossning, ca 15 % minskning från ca 0,30 till 0,25 kWh/ton.

Det är möjligt att göra en enkel kostnadsjämförelse för de tre alternativen baserat på dessa kapacitetssiffror och energikostnader.

Nettokostnaderna för losshållningen (borrning, laddning, sprängämne, tändare, primers mm) för en normal produktionssalva i Långåsen är ungefär 6 kr/ton. Till detta kommer en skutknackningskostnad om ca 2 kr/ton, dvs. totalt fram till lastning ca 8 kr/ton. För den högre specifika laddningen är andelen skut ungefär hälften så stor, 4 mot 7 % ungefär, så vi använder en knackningskostnad om 1 kr/ton. Vi kan uppskatta att elektroniksalvornas skutknackningskostnad ligger mitt emellan Nonel-salvornas, dvs. på ca 1,5 kr/ton.

Den totala kostnaden för hjullastare uppskattas till i runda tal 3 000 kr/effektiv timme. En snabbare skopfyllnad om 1 sek betyder då med en genomsnittlig skopvikt om 8,55 ton en besparing av ca 0,1 kr/ton.

Om Långåsen betalar för kr/ton krossad produkt så är vinsten med ett högre krossflöde marginell men möter man sina produktionsmål snabbare så kan man minska ner på den tid man betalar för lastmaskinernas lagerförings- och utlastningsarbete. Man uppskattar att ett ändrat krossflöde med 50 ton/tim sänker den kostnaden med ca 1 kr/ton. Energin för krossningen kostar på marginalen ca 1–2 kr/kWh eller ca 0,6 kr/ton för normal krossning. Det ger ett mindre bidrag till kostnaderna.

NCC betalade 2 kr/ton merkostnad för i-kon™-kapslarna inklusive uppkoppling och sido-tjänster. Varje hål losshåller ungefär $(3{,}4+3\cdot 2{,}6)/4\cdot 3{,}4\cdot 16 = 152$ fm^3 eller 400 ton med 2 kapslar så merkostnaden per EPD-kapsel blir $2\cdot 400/2 = 400$ kr.

Med detta kan en enkel kostnadsjämförelse göras med en normal Nonel-salva som referens.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 9: Kostnadsjämförelse för sprängningsalternativ när krossen flaskhals

Alternativ (Nonel-N referens)	Nonel-N	Nonel-H	EPD
Specifik laddning, kg/m^3	0,72	0,99	0,78
Merkostnad losshållning, %	0	38	8
Krossflöde, ton/tim	380	400	350
Krosseffekt, kWh/ton	0,30	0,25	0,35
Losshållningskostnad			
Netto losshållning, kr/ton	6,00	8,25	6,50
Skutknackning, kr/ton	2,00	1,00	1,50
Merkostnad tändare, kr/ton	0	0	2,00
Brutto losshållning, kr/ton	8,00	9,25	10,00
ändring skopfyllnad, kr/ton	0	-0,90	-0,90
ändring krossflöde, kr/ton	0	-0,40	0,60
ändring krossenergi, kr/ton	0	-0,10	0,10
Jfr-kostnad, kross flaskhals, kr/ton	8,00	7,85	9,80
Jfr-kostnad, lastn. flaskhals, kr/ton	8,00	8,25	8,70

Tabellen visar att det dyraste alternativet för Långåsen när krossen är en flaskhals verkar vara salvor med elektronikkapslar. Kostnadsminskningen som man får med den snabbare skopfyllnaden äts upp av det försämrade krossflödet och högre energiförbrukningen i krossen. Jämfört med normala Nonel-salvor så är jämförelsekostnaden nästan 2 kr/ton högre. Det är mycket troligt att elektronikkapslarna inom några år blir billigare, kanske ner till 200 kr/st. Då skulle merkostnaden sjunka till 1 kr/ton men det är fortfarande betydande belopp för täkten.

Vi gör åter reservationen att slutsatsen gäller för den valda tändplanen för elektroniksalvorna; 5 eller 10 ms fördröjning mellan hålen i en rad och 67 ms mellan raderna samt en topptändare som släpar 6 ms.

Alternativet Nonel-salvor med hög specifik laddning verkar vara något billigare än Nonel-salvor med normal specifik laddning. Den högre kostnaden för losshållningen kompenseras av snabbare skopfyllnad och lägre krossningskostnader. Det är för den skull inte självklart bättre att spränga med högre specifik laddning. Kvalitén hos fraktioner som inte passerar många steg i krossanläggningen kan bli lidande, t.ex. järnvägsballast 32/64.

Dessa kostnadsrelationer ändras om lastningen är en flaskhals i flödet. Då faller effekten av ändrat krossflöde bort. Vi kan dessutom ladda elektroniksalvorna så att nettolosshållningen är densamma som för referenssalvan. Förutsatt att styckefall och krossningsegenskaper då inte ändras minskar jämförelsekostnaden för elektro-

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

niksalvorna med 0,6+0,5 = 1,1 kr/ton till 8,8 kr/ton. Med mindre skutknackning och billigare EPD-kapslar är det alltså möjligt att elektroniksalvor kan komma att kosta mindre än Nonel-salvor med normal specifik laddning. Med samma förutsättningar ökar jämförelsekostnaden för Nonel-salvor med hög specifik laddning med 0,4 kr/ton till 8,15 kr/ton. Skillnaden mot referensen med normal specifikladdning torde ligga inom felmarginalen för kalkylens ingångsvärden. När man står inför valet att investera i ny krossutrustning är det möjligt att det finare styckefallet möjliggör inköp av en mindre kross, vilket kan flytta kalkylen till fördel för en högre specifikladdning.

Av detta enkla exempel kan man dra tre slutsatser för Långåsens del, att:

1. Jämförelsekostnaden beror starkt på täktens förutsättningar. Andra täkter har andra förutsättningar (bergegenskaper, brytningsgeometri, maskin- och anläggningsutrustning samt produktkrav) som kan ändra den relativa kostnadsbilden.
2. Det kan bli billigare att använda elektroniksprängkapslar, särskilt om priset på EPD-kaps-larna sjunker. Det krävs sannolikt både en mer detaljerad kostnadskalkyl och uppföljning av fler salvor för att avgöra detta.
3. Elektroniksalvornas tändplan är kanske inte optimal. Detta medför också en osäkerhet i bedömningarna.

I kostnadsuppskattningen ingår inte heller effekten av att olika grovt material som går till krossning kan leda till olika utfall för olika slutprodukter i anläggningen, vilka har olika försäljningsvärde och kan kräva omställning av anläggningen. Detta går t.ex. att analysera med programvaran Sandvik PlantDesigner® till vilken Per Svedensten utvecklat en optimeringsrutin baserad på sin doktorsavhandling [16]. En sådan beräkning blir med nödvändighet mycket anäggningsspecifik och går långt utanför projektets mål.

Det ingick inte heller i projektet att analysera vad förkrossen gör med det sprängda styckefallet, t.ex. hur mycket bärlagerfraktion 0/32 mm som krossningsprocessen tillför. Indata i form av styckefallet för provhögarna finns. Utfallet efter förkross i form av fraktionsmassor 0/32 mm, 0/63 mm och totalmassor finns. Effektförbrukningen för krossningen av provhögarna och för salva 3 och 4 finns. Dessa data skulle kunna användas för att testa och eventuellt validera olika krossmodeller, t.ex. med Sandvik PlantDesigner eller liknande programvara.

Bra krossmodeller skulle tillsammans med effektmätning och mätning av styckefallet ut från förkross göra det möjligt att bättre bedöma styckefallet vid sprängning av stora dagbrottssalvor som i Boliden Minerals Aitikgruva [16].

Salvorna i Aitik uppgår till 500 000 ton eller då skulle representativa provhögar bli alldeles för stora och därmed alltför dyra att ta fram och sikta upp. Digitala bildanalysmetoder fungerar bättre på band än i sprängsalvor men de behöver utvecklas. För närvarande börjar 3D-bildteknik användas [17, 18] men mycket återstår att göra innan metoderna kan ersätta siktning.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Erkännanden

Författarna vill först tacka all personal på NCC Roads för deras positiva inställning och goda vilja att göra ett bra jobb och samarbeta i ett forskningsprojekt trots dagliga produktionens krav; borraren Ulf Jonsson, sprängningsansvarige Håkan Lorentzon, geologen Sven Wallman, bergarbetaren Kenneth Hannus m.fl. personer.

Orica ställde genom regionchef Ari Kainulainen villigt upp med Thomas Geidbys erfarenheter av laddning och upptändning av sprängsalvor med både Nonel- och elektroniktändare. Man betalade också Nitro Consults mätningar av markvibrationer och luftstötvågor samt delade ersättningarna till examensarbetarna.

De sex examensarbetare från Bergsskolan utan vars hjälp data för lastcykeltider och krosseffekt inte blivit insamlade förtjänar ett stort tack för sina insatser; Christian Andersson, Johan Larséus, Jesper Samuelsson, Johan Månsson, Björn Andersson och Rickard Granqvist.

Projektledamöterna Fredrik Eklind från Jehanders och Karin Pettersson och Monica Soldinger från Swerock tackas för att de tålmodigt deltagit i alla projektmöten och att de gett sina synpunkter på hur projketet skulle drivas.

Pengar och naturainsatser för att driva projektet har kommit från MinBaS II-programmet, Swebrec, SBUF, NCC, Sandvik Mining and Construction och Orica Mining Services.

Referenser

1. Ouchterlony, F, M Olsson, U Nyberg, G Potts, P Andersson & L Gustavsson (2005) Optimal fragmentering i krosstäkter – Fältförsök i Vändletäkten. MinBaS rapport nr. 1:11. 121 sid. Föreningen Mineralteknisk Forskning, Stockholm.

2. Ouchterlony, F, M Olsson, U Nyberg, G Potts, P Andersson & L Gustavsson (2006) Fragmenteringsförsöken i Vändle och designkurvor för ändring av specifik laddning. BK 2006, sid 97–122. Bergsprängningskommittén, Stockholm.

3. Cunningham, C V B (1987). Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on. *I Proc 2nd Intnl Symp on Rock Fragmentation by Blasting*, sid 475-487. W L Fourney & R D Dick red, SEM, Bethel CT, USA.

4. Ouchterlony, F (2005). The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology, Trans of the Institute of Mining and Metallurgy A* vol 114, sid A29–A44.

5. Andersson, C & J Larséus (2008). Inverkan på styckefall, lastbarhet och krossning vid användning av elektroniska sprängkapslar vid pallsprängning. – En metodstudie. Examensarbete bergteknik E3644, Bergsskolan, Filipstad.

6. Samuelsson, J & L J Månsson (2009). Inverkan på styckefall, lastbarhet och krossning vid pallsprängning med hög respektive normal specifik laddning – metodutveckling. Examensarbete bergteknik E3763, Bergsskolan, Filipstad.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

7. Andersson, B & R Granqvist (2009). Inverkan på styckefall, lastbarhet och krossningseffekt vid pallsprängning med elektroniska sprängkapslar – metodutveckling. Examensarbete bergteknik E3737, Bergsskolan, Filipstad.

8. Ouchterlony, F, U Nyberg, M Olsson, K Vikström & P Svedensten (2010) Optimal fragmentering i krosstäkter, fältförsök i Långåsen. MinBaS rapport i manus. Föreningen Mineralteknisk Forskning, Stockholm.

9. Roads (2008). Nya sprängkapslar minskar vibrationer. Roads, tidningen om ballast och beläggning, nr 2, sid 14–16. NCC.

10. Vanbrabant, F & A Espinosa (2006). Impact of short delays sequence on fragmentation by means of electronic detonators: theoretical concepts and an field validation. *I Proc Fragblast 8, Proc 8th Intnl Symp on Rock Fragmentation by Blasting*, sid 326–331. Editec SA, Santiago, Chile.

11. Rorke, A J (2007). An evaluation of precise short delay periods on fragmentation blasting. *I Proc 4th EFEE World Conf on Explosives and Blasting*, sid 257–263. P Moser red. EFEE, Reading, England.

12. Lislerud, A (1990). Fjellsprengningsteknikk. Doktor ingenjøravhandling 1990:85, 229 sid. Institutt for anleggsdrift, NTH, Trondheim.

13. Cunningham, C V B (2005). The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. *I Proc 3rd EFEE World Conf on Explosives and Blasting*, sid 201–210. R Holmberg red. EFEE, England.

14. Hansson, H (2009). The influence of timing on fragmentation of rock, numerical studies. Swebrec report 2009:U3.

15. Ouchterlony, F (2009). A common form for fragment size distributions from blasting and a derivation of a generalized Kuznetsov's x_{50}-equation. *I Proc 9th Intnl Symp on Rock Fragmentation by Blasting*, sid 199–208, J A Sanchidrián red. Taylor & Francis, London.

16. Svedensten, P (2007). Crushing plant performance. Doktorsavhandling vid Inst för tillämpad mekanik, ny serie nr 2648, CTH, Göteborg.

17. Ouchterlony, F, U Nyberg, P Bergman & S Esen (2007). Monitoring the blast fragmentation in Boliden Mineral's Aitik mine. *I Proc 4th EFEE World Conf on Explosives and Blasting*, sid 47–62. P Moser red. EFEE, Reading, England.

18. Noy, M J (2006). The latest in on-line fragmentation measurement – stereo imaging over a conveyor. *I Proc Fragblast 8, 8th Intnl Symp on Rock Fragmentation by Blasting*, sid 61–66. Editec SA, Santiago, Chile.

19. Thurley, M J (2009). Fragmentation size measurement using 3D surface imaging. *I Proc 9th Intnl Symp on Rock Fragmentation by Blasting*, sid 229–237, J A Sanchidrián red. Taylor & Francis, London.

© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Bilaga. Uppställning av designformler

Storheter, beteckningar och formel-n:r för designkurvor för Nonel-salvor, Tabell 7–8.

Sprängämnets densitet, kg/m^3	Håldiameter, mm	Laddningskoncentration, kg/m	Försättning, m	Hålavstånd, m	Pallhöjd, m	Underborrning, m	Hållutning, °	Laddad hålängd, m	Avladdning, oladdat hål del, m	Sprängämne per hål, kh/hål	Försättning i första rad, m	Antal rader	Teoretisk fast volym per hål, m^3	Specifik laddning, kg/m^3	Sprängämnets explosionsenergi, MJ/kg	Viktsyrkan relativt ANFO, %	Bergfaktorn, oklar dimension	Medelstyckefall (medianvärdet), mm	Kröknings exponenten, dimensionslös	Styckefallskurvans lutning vid x_{50}, 1/mm	Övre gräns för största sten i salvan, mm	Andelen sten i salvan < 1000 mm, %	Andelen sten i salvan < 32 mm, %
ρ_e	$Ø_e$	Q'	B	S	H	UB	α	L	OL	Q	B_1	n	V_b	q	e	s_{ANFO}	A	x_{50}	b	s_{50}	x_{max}	P_{1000}	P_{32}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

Formler fram till bergfaktorn A:

3: $Q' = \pi/4 \cdot (Ø_e/1000)^2 \cdot \rho e$ 9: $L = (H\text{-}UB)/\cos\alpha - OL$ 11: $Q = Q' \cdot L$

14: $Vb = [(n\text{-}1) \cdot B + B1]/n \cdot S$ 15: $q = Q/V_b$ 17: $s_{ANFO} = 100 \cdot e/4{,}0$

18: $A = 0{,}039 \cdot (RMD+RDI+HF)$; för Nonel-salvor enligt ekv. 2

a: RMD = 10 (om starkt vittrat) eller JF (om vertikala slag) eller 50 (om massivt).

b: JF = JPS (medelsprickavstånd S_J) + JPA(stupningsvinkel från front β)

b: JPS = 10 (om $S_J < 0{,}1$ m) eller 20 (om $0{,}1 < SJ < x_{skut}$) eller 50 (om $S_J >$ skut)

c: JPA = 20 (om β ner ur pall) eller 30 (om strykning $\perp$ front) eller 40 (β upp ur pall

d: $RDI = 0{,}025 \cdot \rho_b - 50$; bergdensiteten ρ_b, kg/m^3

e: HF = E/3 om E<50 eller UCS/5 om E>50; E-modul (GPa), tryckhållf. UCS (MPa)

19: $x_{50} = 10A \cdot Q^{1/6} \cdot (115/s_{ANFO})1^{9/30}/q^{0{,}84}$ enligt ekv. 1

20: b = Plats- och troligen tändarspecifikt; b = 4,17 för Nonel-salvor och annat för EPD.

21: $s_{50} = 0{,}2 \cdot (0{,}0415/B)^{0{,}25}/x_{50}{}^{0{,}75}$ enligt ekv. 4

22: $x_{max} = x_{50} \cdot \exp(4s_{50} \cdot x_{50salva}/b)$ enligt ekv. 4

23: $P_{1000} = P(1000) = 100/\{1+[\ln(x_{max}/1000)/\ln(x_{max}/x_{50})]^b\}$ och skutandel $Sk = 100\text{-}P_{1000}$

24: $P_{32} = P(32) = 100/\{1+[\ln(x_{max}/32)/\ln(x_{max}/x_{50})]^b\}$.