© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

11. Det är väl på tiden att vi minskar tiden, eller? – effekten av korta fördröjningar i Aitik

Daniel Johansson[1], Evgeny Novikov[2], Nikolaos Petropoulos[1], Ulf Nyberg[1] och Jonny Sjöberg[3]. [1]Swebrec at LTU, Luleå Tekniska Universitet, [2]Boliden Mineral AB, [3]Itasca Consultants AB

Inledning

Produktionssalvor i gruvindustrin består huvudsakligen idag av borrning av spränghål efter en förutbestämd geometrisk design, en given laddningsmängd per hål samt tändplan med pyrotekniska sprängkapslar. Salvornas fragmentering påverkar direkt kostnader och produktiviteten hos de efterföljande momenten som till exempel lastning, krossning och malning. En förbättrad fragmentering kan leda till ökad produktivitet och minskad energianvändning hos krossar och kvarnar.

Upptändningen av salvan har stor inverkan eftersom spränghålens initieringstider bör av praxis vara sådana att stötvågorna från detonationen har tid att reflekteras till en dragvåg vid den fria ytan. Tidigare forskning (Se exempelvis Katsabanis m. fl, 2006, Stagg & Nutting, 1987) har visat att vi har ett förhållandevis brett tidsintervall för den optimala fragmenteringen (mellan hål i raden) där $\Delta t/B \approx 3–30$ ms/m försättning. Till detta tillkommer ett rekommenderat intervall mellan raderna mellan 13–60 ms/meter försättning.

Det har även föreslagits att mycket korta fördröjningar (Rossmanith, 2002) ger den finaste fragmenteringen, där man baserar teorin på dynamisk brottmekanik och vågutbredning.

Ett väldokumenterat och publicerat praktikfall i full-skala av Vanbrabant &Espinosa (2006) har tillämpat korta initieringstider och dess effekt på fragmenteringen. Deras tillvägagångssätt var baserat på Rossmanith (2002) och Kouzniak & Rossmanith (2004) och fördröjningarna bestämdes för att skapa en överlappning (interaktioner) av de negativa partikelhastigheterna hos de alstrade P-vågorna partikel hastigheter(snarare än dragspännings komponenten i P-vågen). Dock bör det anmärkas att sambandet mellan spänning och partikelhastighet är en högst komplicerad fråga, speciellt vid tredimensionella geometrier.(Se till exempel Bjarnholt & Skalare 1981;Blair & Minchinton 1996; Ouchterlony m.fl. 2001).

Chiappetta (2010) hävdar att de optimala fördröjningstiderna bör ligga i intervallet där stötvågor samverkar mellan hålen, d.v.s. stötvågen från ett tidigare hål i raden bör inte ha nått nästa i raden när nästa initiering börjar. Baserat på bildanalys kunde en förbättrad fragmentering påvisas, dock ej med officiella fragmenteringsanalyser.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

För att uppnå dessa interaktioner krävs väldigt korta fördröjningar, ner till 1 ms mellan hålen vilket inte är möjligt med dagens pyrotekniska fördröjningar. För att kunna tillämpa denna metod måste elektroniska sprängkapslar användas, vilka har även en mycket mindre spridning mot de pyrotekniska som har en spridning på ± 6 ms eller mer. Emellertid så saknas det kvantitativa beräkningsmodeller som beskriver detta fenomen i detalj.

För att fylla denna kunskapslucka har forskningsprojektet ”Bättre fragmentering med precis upptändning” initierats och är nu i dess slutskede. Projektets mål är att utreda teorierna och utveckla bättre numeriska verktyg för att simulera sprängning med elektroniska fördröjningar (Sjöberg, 2012; Schill, 2012). Till detta tillkommer utvärdering av hypoteserna genom fullskaliga försök i Aitik. Projektet drivs genom gemensamma insatser mellan de industriella parterna LKAB, Boliden Mineral och Swebrec samt finansiering från VINNOVA. De huvudsakliga syftena med projektet är att förbättra fragmenteringen samt att studera konceptet med stötvågsinteraktioner mellan spränghålen och om detta förbättrar fragmenteringen.

Denna artikel presenterar ett urval av de resultat baserade på utförda fältförsök i Aitik under 2012.

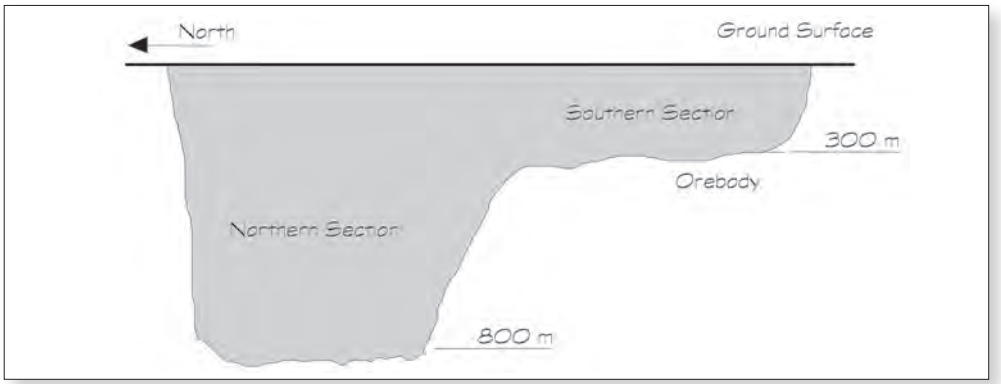
Aitikgruvan och dess produktionssystem

Aitikgruvan ligger utanför Gällivare och är Sveriges största koppargruva. Mineraliseringen består av kopparkis och pyrit, vilket innehåller koppar, guld och silver. Malmen är en låghaltig kopparmineralisering med cirka 0,27 % koppar, 0,16 g guld/ton and 2,07 g silver/ton och sträcker sig i ett område som är 2500 x 300 m i storlek.

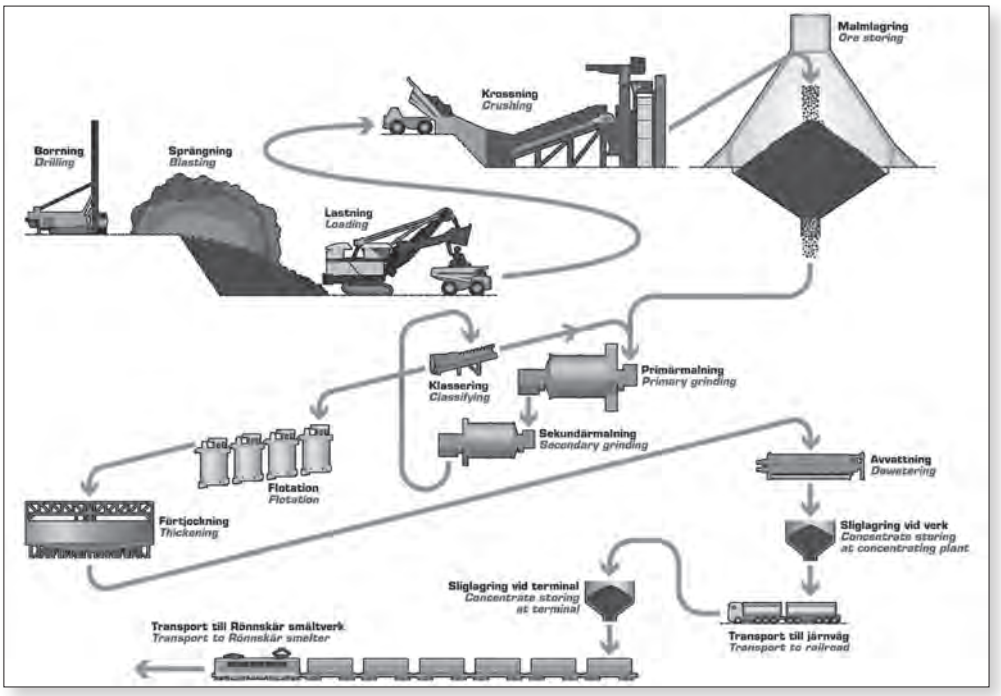
Figur 1: Bild över Aitikgruvan (Bolidens fotoarkiv, 2010)

Malmkroppen ligger längs en NNV-SSÖ tektonisk zon, vilken utgör en kollisionsyta mellan två äldre kontinenter. Denna skjuvzon har troligtvis varit aktiv ett flertal gånger. Berggrunden i Aitikområdet består av prekambriska vulkaniska och sedimentära graniter och gabbrobergarter. Malmkroppen är ungefär 2000 meter lång, ca 300 meter bred och känd till mer än 800 meters djup. Den lutar 55–60° åt väst närmast liggväggen under malmkroppen och 45° åt väst vid hängväggen, ovanpå malmkroppen. I den södra delen av malmkroppen når malmen ner till ca 350 meters djup och uppemot 800 meter i den norra delen (Se Figur 2).

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 2: Schematisk bild över Aitikmalmen (Sjöberg, 1999)



Figur 3: Processöversikt i Aitik (www.boliden.com).

Efter borrning och sprängning lastas malmen på gruvtruckar och transporteras till krossar. Med hjälp av bandtransportörer flyttas krossad malm vidare till två malmlager som försörjer kvarnarna i anrikningsverket. Senare transporteras producerat koncentrat till smältverket via järnvägen (Se Figur 3).

Pallsprängning är den vanligaste brytningsmetoden i Aitik. Vid produktionsborrningen används rotationsriggar Atlas Copco Pit Viper 351 E, vilka producerar Ø311mm spränghål till ett djup av ca 17 meter, inklusive underborrning på ca 2 meter. En salva består normalt av mellan 200–300 borrhål, vilka ger ca 700 000 ton

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

losshållet berg som antingen klassificeras som malm, grå- och miljögråberg. Utöver produktionsborrningen utförs även förspräcknings-, konturhåls- och tilläggsborrning. För detta ändamål används sänkhammarborrning med borrhålsdiameter på 127 och 152 mm.

Salvan laddas med emulsionssprängämne (Kemitti 610), ca 900 kg per hål och sprängs normalt en gång/vecka. Sprängämnets medeldensitet är cirka 1 150 kg/ m^3 och har en dokumenterad detonationshastighet (VOD) på cirka 5 700 m/s. Salvan är fördröjd med 176 ms mellan raderna och med 42 ms mellan hålen. Aktuell specifik laddning är ca 1,02 kg/m^3. Emulsionssprängämnet känsliggörs genom att ett gasbindningsmedel (Prillit, ANPP 25–30%) tillförs i samband med fyllningen av borrhålet. Förladdningen är ca 5,5 m djup och består av finkrossat berg. Spränghålet lämnas därefter orört till dess att sprängning sker. Samma dag som sprängning skall ske sammankopplas slangarna från NONEL-tändkapslarna i borrhålen ihop med ytfördröjningsblock i ett på förhand bestämt mönster. Ytfördröjningsblocken ser till att sprängladdningarna detonerar en och en med bestämda fördröjningar. Lastning sker till största del med grävmaskiner och till viss del med hjullastare. Dessa enheter har skopstorlekar mellan 16 och 43 m^3. Transporten sker med bergtruckar från lastning till krosstationen och med transportband från krosstationen till anrikningsverket.

Projekt Aitik 36 med 5,2 miljarder SEK beräknad investering innebär en fördubbling av den årliga malmproduktionen till 36 Mton. Projektet består av nya krosstationer, nytt malmlager och anrikningsverk samt malmtransportlösning i form av bandtransportör. Vid ett ökat flöde är optimering av gruvans produktionsprocesser en viktig del av kostnadseffektiv produktion.

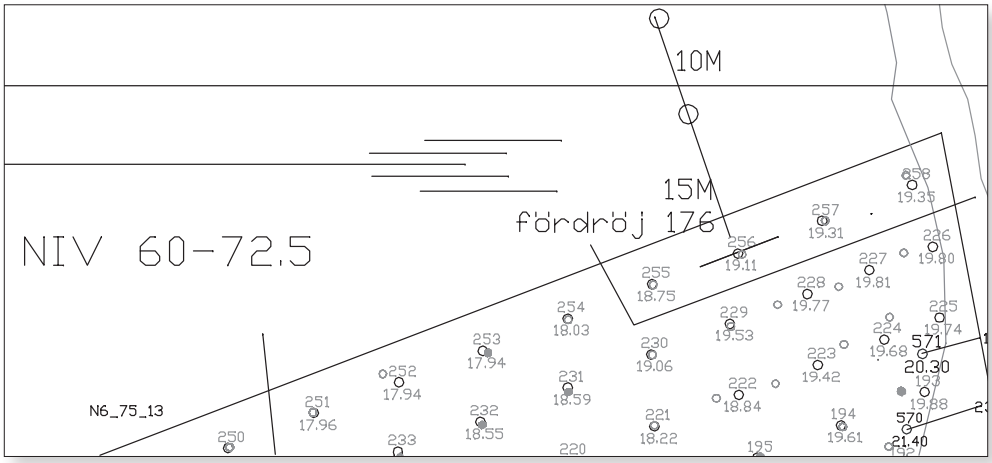
Sprängning är en av huvudprocesserna i gruvbrytning och dess resultat har stor inverkan på Aitiks totala ekonomi. Enligt Bergman (2005) så påverkar fragmenteringen inte bara gruvans produktivitet och enhetskostnader utan även de efterföljande processerna som krossning och malning i anrikningsverket.

Försökens uppläggning och genomförande

Nollförsök

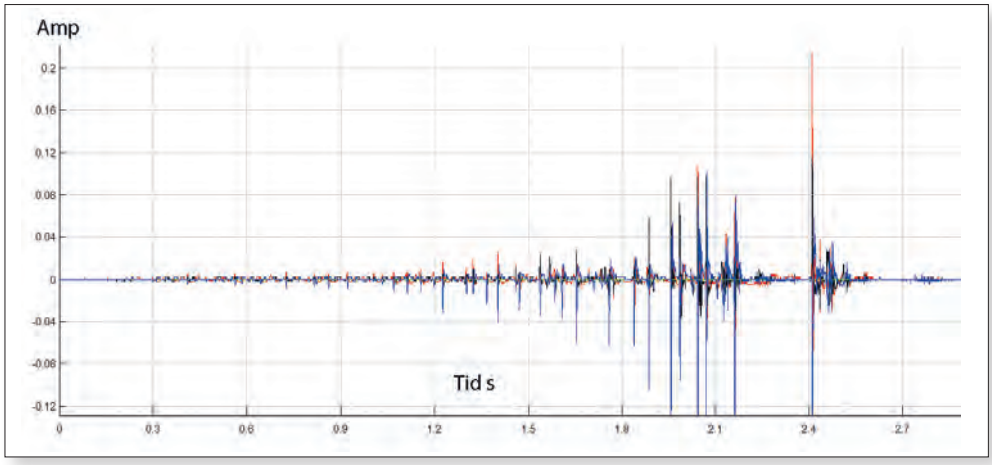
För att få information och kunna tillämpa teorin gällande stötvågssamverkan, så genomfördes s.k. nollförsök. Nollförsökens syfte var att bestämma de karaktäristiska vibrationssignalerna vid omkring 10–15 m bakom salvan (jmf. hålavstånd i Aitik är 8.6 m). Detta kan tillämpas för att bestämma den optimala fördröjningen föreslagen av tidigare forskning. (Rossmanith, 2002; Vanbrabant and Espinosa, 2006, m.fl). Signalerna generades av Ø311 mm produktionshål, vilka var laddade med emulsionssprängämne. Det som var av intresse var att ta fram frekvensspektra, utbredningshastighet samt vågamplituder vid olika avstånd från spränghål. Mätningar vid sådana korta avstånd visar vanligtvis väldigt höga accelerationer och frekvenser, uppemot 5000g respektive 4 kHz och därför valdes accelerometrar till dessa försök (se Ouchterlony m fl. 1997, Nyberg m fl. 2005, Wimmer m fl., 2012, Shirzadegan m fl., 2012 och Johansson, 2012).

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 4: Design vid nollförsök nr 3, salva med hålavstånd 8,6m och försättning 7 m.

För att få så tydliga signaler som möjligt, d.v.s. att undvika störningar från flera vågankomster, så separerades tiderna ut för 3–4 produktionshål i den bakersta raden (se Figur 4) hos försökssalvorna med cirka 176 ms (pyroteknisk upptändning). Mätavstånden baserades dels på praktisk erfarenhet och dels på avstånden (8,6 m) mellan spränghålen som motsvarar det optimala mätavståndet, eftersom det fanns en risk för bakåtbytning upp till 7–8 m. Dock inte för långt från spränghålen, eftersom då kan ingen meningsfull signalanalys genomföras. Mätutrustningarna placerades i linje enligt Figur 4 och bestod av 2 stycken triaxiella accelerometrar. Totalt genomfördes tre nollförsök, varav två gav tillförlitliga data samt detonationshastigheter som gick att vidare analysera. Nollförsök # 1 gav inte några användbara signaler, fast från nollförsök 2 och 3 kunde signaler från 3 respektive 5 hål analyseras.

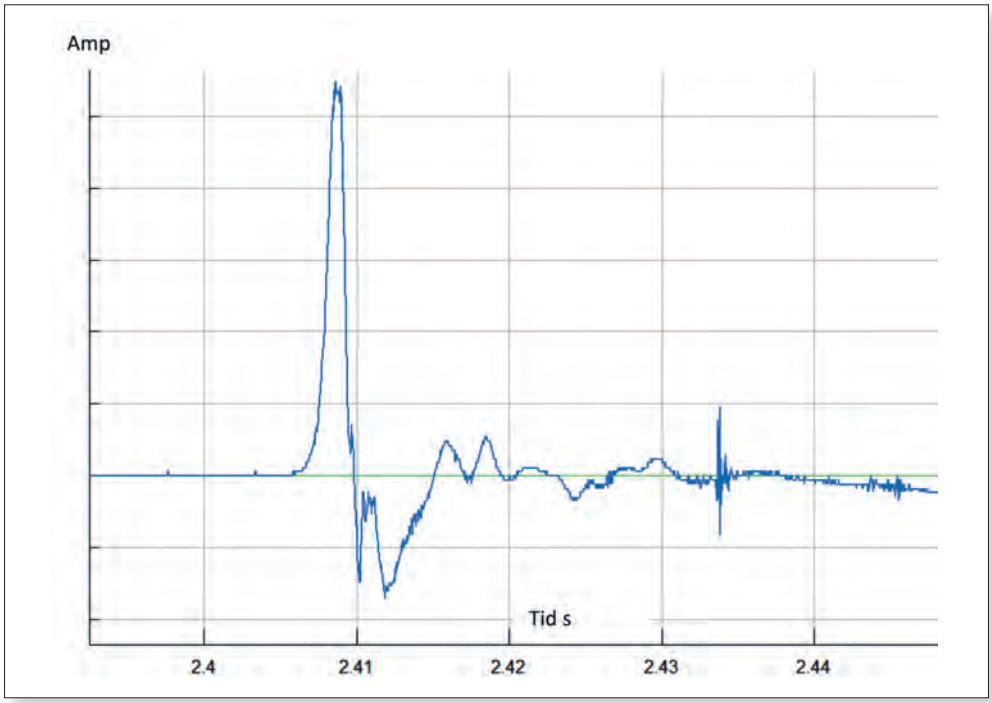


Figur 5: Data från en triaxiell accelerometer på ca 15 meters avstånd från mitthål 256 i Figur 4. Mätningen genomfördes den 10 november 2011. Observera att amplituden är orimligt låg vilket beror på skalningsproblem.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Figur 5 visar triaxiella data från noll-försök nr. 3 den 10 november 2011. Signalerna till vänster i figuren har lägre amplitud d v s spränghålen ligger på relativt långt avstånd från mätpunkterna. De spränghål som ligger närmast mätpunkterna, d v s till höger i figuren, är på grund av de kortare avstånden mellan spränghål och mätpunkt mest representativa för beräkning av våglängd för stötvågssamverkan och har därför valts ut för analys. På grund av fel i skalning är amplituden orimligt låg vid jämförelse med tidigare data, se Ouchterlony m.fl., (1997).

I Figur 6 visas ett exempel uppmätta accelerationer på 18,5 meters avstånd och 2,4 s från spränghål 256 i figur 3. Periodtiden T för detta fall är cirka 8,9 ms, vilket ger en dominerande frekvens på 112 Hz. All data från de triaxiella mätningarna uppmättes på avstånd mellan 18 – 25 m från spränghålen.



Figur 6: En av signalerna (2,4 s) från försöket 10 november 2011.

Tabell 1 nedan visar resultaten av en enkel bedömning av typiska våglängden för signaler som i Figur 6 för Ø311 mm produktionshål. Våglängden har beräknats från n=4 värden för försök 2 och n= 21 värden för försök 3. Signalens positiva fas är ofta kortare än den negativa vilket också har observerats av Yang (2012). På grund av att den positiva fasen är lättare att avläsa har den använts istället för periodtiden för bedömning av fördröjningstiderna mellan spränghålen. Så kallad Power Spectral Density (PSD) har utförts för beräkning av signalspektra, men har inte använts på grund av osäkerhet i avläsning av dominerande frekvenser.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

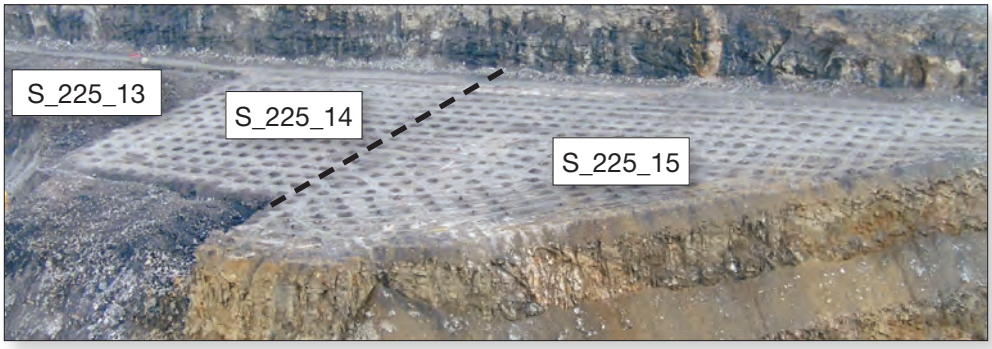
Tabell 1: Positiv fas, period och frekvens (PSD) för signaler på ca 15–25 meters avstånd från mitthålen för de två nollförsöken.

	Positiv fas δt ms	Period T ms	2· δt ms	1/T Hz	PSD Hz
Medelvärde #2	3,8	7,0	7,6	154	110
Stdavv #2	0,5	1,4		35	75
Medelvärde #3	2,6	6,6	5,2	285	210
Stdavv #3	1,3	6,1		209	99

För att tillämpa konceptet med överlagringar av negativ partikelhastighet, beräknades enkelt uttryckt skillnaden i initieringstider för produktionshålen utifrån den positiva fasen i Tabell 1 och stötvågens gångtid mellan två närliggande produktionshål antaget vågens utbredningshastighet på 5000 m/s. För att få data jämförbara med andra mätningar av partikelhastighet har fasförskjutningen mellan acceleration och hastighet också använts. Detta i kombination med uppmätta partikelhastigheter hos installerade geofoner i närliggande platser (Likavaara och Sakajärvi) gav efter analys jämförbara resultat, en maximal fördröjning på 6 ms mellan hålen i raden med avseende på överlagring.

Fältförsök och försöksmatris

De fullskaliga försöken genomfördes i den södra delen av gruvan, på nivåerna 210 respektive 225 m avv. Geologin för området och för alla testsalvor visade sig vara tämligen lika, vilket minimerade geologins effekt på resultaten.



Figur 7: Översiktsbild av försöksområde vid nivå 225 i Aitik.

Försökssalvorna (Tabell 2) varierade i storlek, från 225 000 ton upp till 860 000 ton och i försök med korta initieringstider användes I-kon™ RX. Dessa har en noggrannhet på ± 0.13 ms i intervallet 0–1 300 ms och ± 0.01 % i intervallet 1 301–15 000 ms. Fördröjningarna mellan raderna var detsamma som standardsalvor dvs. 176 ms mellan raderna, vilket innebar att utvärderingen var baserad på interaktioner (samverkan mellan stötvågor) inom raderna.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 2: Försöksmatris – val av fördröjningar.

Försök nr	Salva nr	Nominell fördröjning (ms)	Förväntad interaktion
1	S_210_11	42	Referenssalva med pyroteknisk upptändning
2	S_210_12	6	Överlagring baserad på nollförsök (Vanbrabant & Espinosa, 2006)
3	S_225_11	1	Interaktion mellan spränghålen, (rekommenderad av Chiappetta, 2010)
4	S_225_12	3	Överlagring av skjuvvågor
5	S_225_13	42	Referenssalva med pyroteknisk upptändning
6	S_225_14	1	Repetition av försök 3

Insamling av data

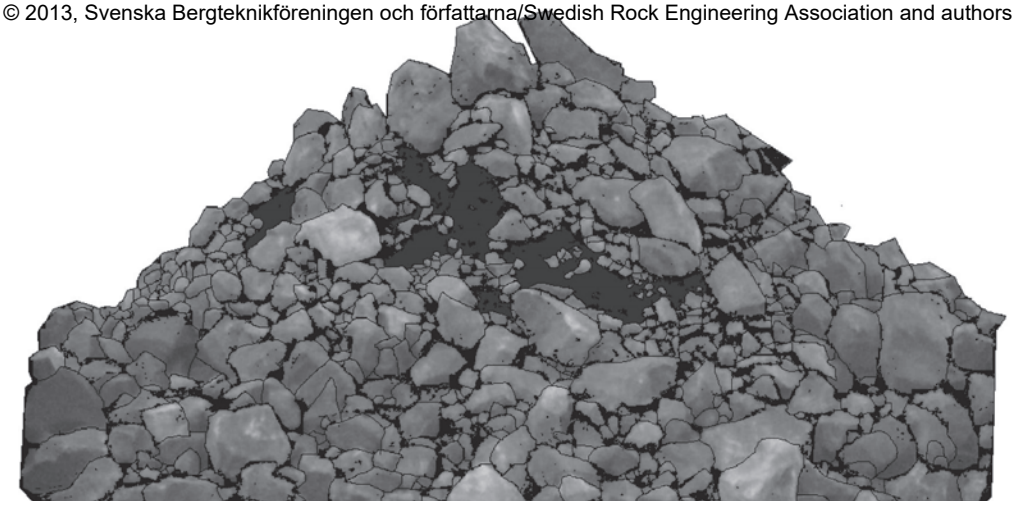
Gruvan bidrog med GPS-data för varje enskild salva dagen innan varje sprängning, vilket sedan användes i kombination med ett s.k. RTK- system (Real Time Kinematic). Systemet kan göra inmätningar med noggrannhet ner till centimeternivå, vilket i detta fall användes till att mäta svällningen av salvan. Upp till 400 mätpunkter per salvhög mättes in för att bestämma svällningen av varje salva.

Salvorna filmades med en höghastighetskamera av modell Canon Exilim Pro EX-F1, som med 300 bilder per sekund kunde ge högkvalitativa filmer för analys av initiering och massrörelser. Alla salvor utom en gick att analysera med höghastighetsfilmningen.

För varje trucklass togs en serie bilder, då lastningen påbörjades. Upplösningen på bilderna är 10 Megapixlar (3 872 x 2 592) med 300 dpi och 24-bitars djup samt med en brännvidd på f=7,3 till f= 87,6 mm vilket motsvarar 36 till 432 mm i 35 mm filmformat. Tillvägagångssättet var, att påbörja datainsamlingen, då lastningen kommit cirka 3 rader in i salvan. Detta för att få jämförbara förhållanden mellan varje enskild salva, därför att inspänningen hos dem varierade beroende på om den tidigare salvan hade lastats ut eller inte. Sedan vidtogs åtgärder för att få den mest

Figur 8: Exempel på trucklass med olika styckefallsfördelningar som ingick i analysen.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 9: Exempel på bild efter styckeindelning.

lämpliga bildvinkeln mot de sprängda massorna vilket i detta fall var rakt bakom truckarna. Dock var detta inte möjligt vid de två första försöksalvorna, då det inte fanns någon säker plats för att ta foto över trucklassen. Detta påverkade den efterföljande analysen, eftersom den geometriska skalningen inte blev likvärdig.

Idag finns ett flertal programvaror som kan göra fragmenteringsanalyser genom bildanalys, exempelvis Split Desktop, FragScan, GoldSize, CIAS, IPACS, FragMetrics, m.m. I Aitik finns FragMetrics redan installerat i skopan, för analyser av fragmenteringen hos varje enskild skopa som lastaren tar. Utifrån dessa analyser (dålig bildkvalitet m.m) användes inte detta system i utvärderingen av fragmenteringen. Efter en jämförande utvärdering av FragMetrics och Split Desktop, så valdes SplitDesktop (version 3.1.0.76 64-bitar), vilket involverade importering och skalning av bilderna (truckflakens enskilda mått tillämpades här för korrekt skalning).

Split Desktop hade förinställda grundinställningar som kan användas i början av analysen Exempelvis så var finandelen inställd på 50 % för alla analyserade bilder för att bibehålla en väldigt känslig parameter konstant. Tillika gjordes funktioner för identifiering av skut inaktiva, eftersom detta skulle påverka fragmenteringsanalysen. Alla bilder analyserades av en och samma person, eftersom olika personer analyserar bilder något olika och har identifierats som en möjlig felkälla vid bildanalyserna. Från varje enskild salva analyserades 40 bilder och varje bild tog cirka 1-2 timmar att analysera (Se Figur 9).

Valda försöksresultat

Arbetet i detta projekt har generat stora mängder data, vilka flertalet har analyserats och utvärderats (Petropoulos m.fl., 2013). Figur 7 och 8 nedan visar det uppmätta styckefallet. Salvorna 210_11 och 225_13 är referenssalvor med pyroteknisk initiering. De övriga har sprängts med elektronikkapslar för noggrant bestämda intervalltider mellan hålen i rad. Dock att notera är att två repetitioner har genomförts dels

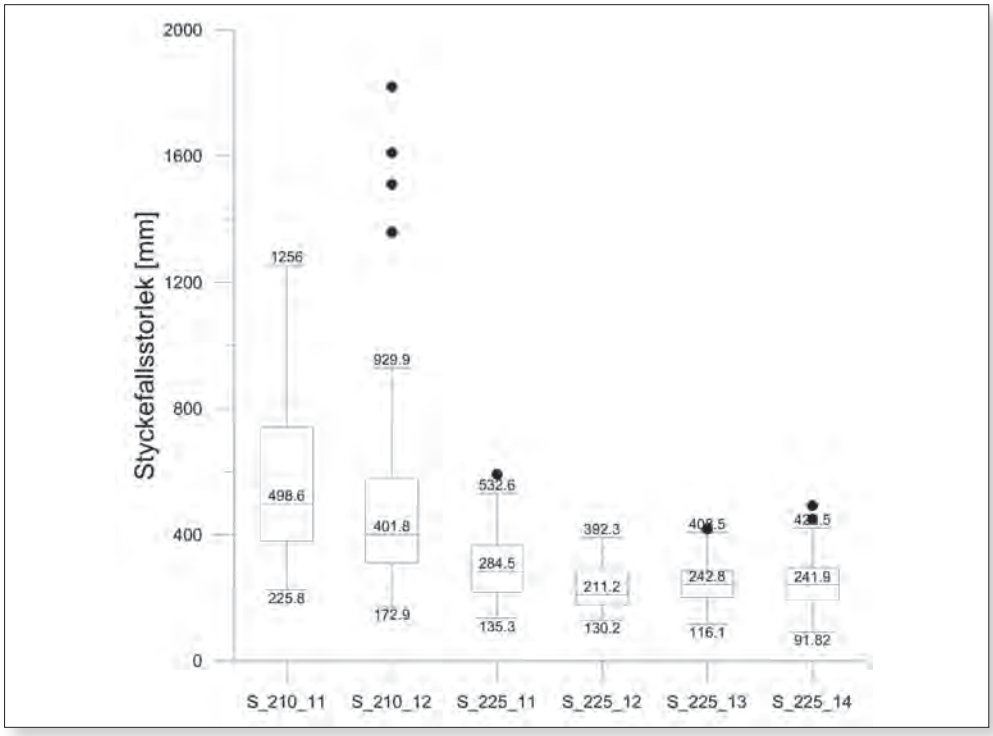
© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

för referenssalvorna och dels för elektroniksalvorna med 1 ms fördröjning (salvorna 225_11 och 225_14) mellan hålen. För de andra salvorna var repetition inte möjlig. Här följer ett sammanfattande urval från dessa analyser av fragmentering, krosseffekter samt svällning och som gjorts under 2012.

Fragmentering

Utifrån de analyserade bilderna utvärderades de individuella salvornas fragmentering i detalj (se Figur 10) med fokus på x_{50} respektive x80. Resultaten visar stor spridning hos de två första försöksalvorna S_210_11 och S_210_12. En förklaring till detta kan vara att bilderna på dessa trucklass togs i en annan vinkel jämfört med de senare salvorna, vilket kan ge geometriska skalningseffekter vid analys. Försöket med 6 ms fördröjning visade ett flertal stora skut (x_{max}) uppemot 1820 mm i storlek.

Spridningen (se Figur 10) blir betydligt mindre för resten av försöken på nivå 225 m. Det finns dock vissa extremvärden, som för x_{max} än vid de tidigare försöken. Det var endast en salva som visade något lägre styckefall d.v.s. salva S_225_12 med 3 millisekunders fördröjning. Försökssalvan med den kortaste fördröjningstiden (1 ms) gav dels olika styckefall och dels något större styckefall än salva 225_12. Vid analys av x_{80} så var trenden densamma. Sammantagen kan man säga att styckefallet baserat på uppmätta data är dels osäkert (nivå 210) och dels är skillnaderna för små för att dra säkra slutsatser om samband mellan upptändning av salvorna och styckefallet (nivå 225).



Figur 10: Diagram över spridningen av observerade x_{50}-värden för försökssalvorna.

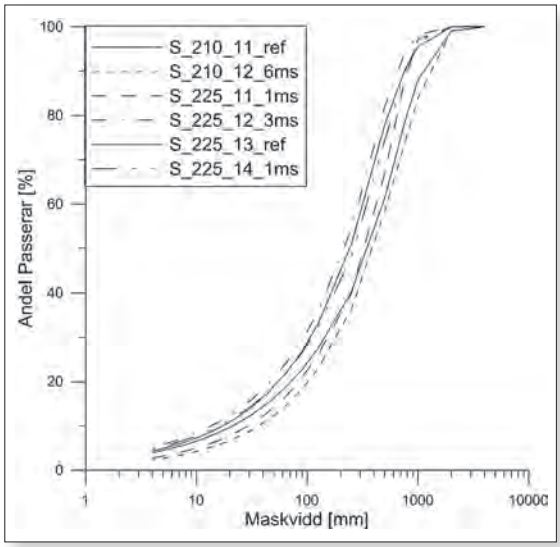
© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

I figuren nedan illustreras fragmenteringens medelvärde för de 6 utvärderade salvorna, 4 med korta fördröjningar genom elektroniska sprängkapslar och 2 med standardfördröjning med pyroteknisk upptändning. Det är medelvärden av 40 bilder per salva, som har analyserats.

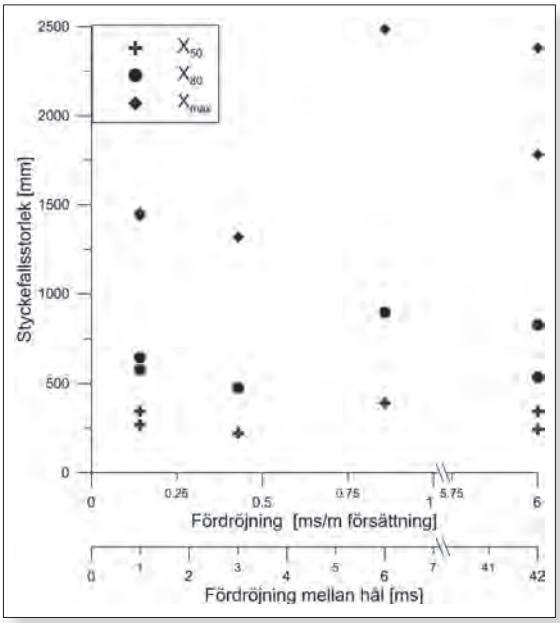
Det man kan se baserat på dessa försök var att den grövsta fragmenteringen återfanns vid en fördröjning av 6 ms mellan hålen, dock följer den väldigt nära en av två referenssalvor. Man måste dock komma ihåg att dessa två salvor inte hade samma kameravinkel vid fotografering av trucklass som de övriga, vilket i sak påverkar deras resultat jämfört med övriga salvor.

Den finaste fragmenteringen observerades enligt Figur 11 vid 3 ms fördröjning mellan hålen (S_225_12) och vid 1 ms fördröjning (S_225_11) var skillnaden marginell gentemot referenssalvan (S_225_13).

För att sammanfatta de enskilda fördröjningarnas effekt på fragmenteringen kan man utvärdera x_{50} (där 50 % av massan passerar), x_{80} (där 80 % av massan passerar, gräns för skut) samt x_{max} (största observerade storleken). I Figur 12 visas hur de olika resultatparametrarna varierar beroende på fördröjningen, vilket är baserat på 99.95 % av den analyserade mängden. Det som kan ses även här är att salva S_225_13 med 3 ms fördröjning hade den minsta observerade skutstorleken. Fast någon direkt slutsats gällande sambanden mellan fördröjningarna och styckefallen kan inte dras, eftersom resultaten inte följer någon tydlig trend.



Figur 11: Styckefallskurvor för de testade fördröjningarna.



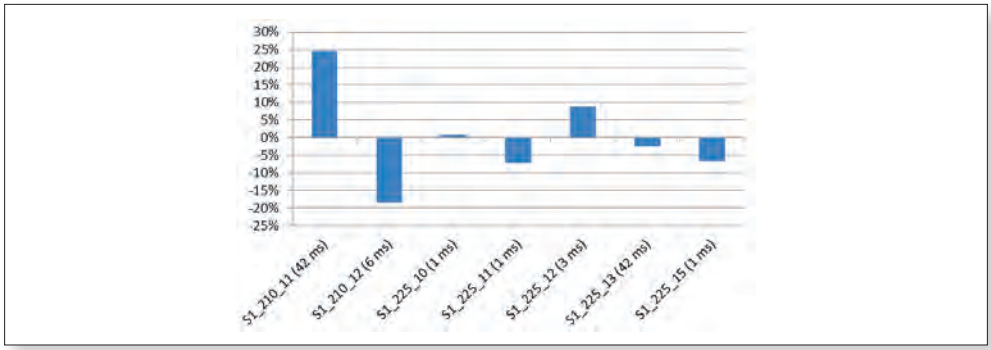
Figur 12: x_{50}, x_{80} och x_{max} vs. Fördröjningstid [ms].

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

För övrigt gjordes intervjuer med personal inom lastningen och krossningen. Där visade det sig att för observationer vid 1 ms fördröjning så var det nästintill ingen skuthantering, materialet såg finare ut och att det var mycket lättare att lasta. Personalen observerade även att det var ovanligt hög genomströmning genom krossarna vid detta försök.

Krosseffekter

För att utvärdera fördröjningarnas effekt på efterföljande processer, så utvärderades även energibehovet vid primärkrossarna. Med hjälp av Aitiks ledningssystem ”Minestar” för alla mobila produktionsenheter så kunde malmen från varje enskild salva spåras och utvärderas vid krossningen. I Figur 13 redovisas det erforderliga energibehovet för att krossa ett ton i respektive försökssalva. Det lägsta energibehovet observerades vid salva S_210_12 (6 ms), vilket var en reduktion på närmare 34 % jämfört med referenssalva S_210_11 (42 ms) på samma brytningsnivå. Man bör dock observera att S_225_15 (42 ms) visade mycket lägre energibehov vid krossning, vilket sin tur reducerade skillnaden till 16 %. Analysen visar att det är spridning mellan försök vid samma fördröjningstid, både i tidigare nämnt 42 ms fördröjning samt 1 ms fördröjning. Vid 1 ms fördröjning observerades relativa skillnader upp till 9 % mellan de två försöken.

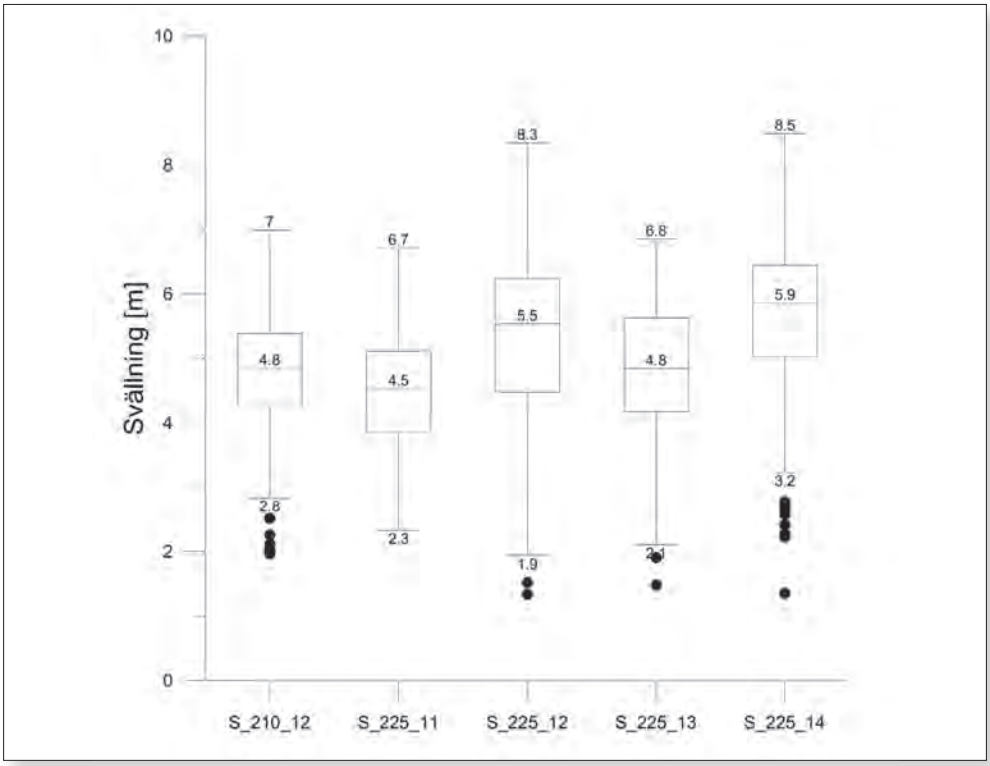


Figur 13: Relativt energibehov vid krossning av försökssalvor från beräknat medelvärde.

Svällning

Baserat på de mätningar som genomfördes vid varje försök, så finns det inga signifikanta skillnader i svällning. Mätningarna indikerar inga tydliga samband mellan fördröjningar och hur mycket respektive salva svällt i vertikalled (Figur 9). Det som kan observeras är att spridningen i svällning när samma fördröjning använts varierar. Svällningen för salva S_225_11 visar mindre svällning och spridning i jämförelse med salva S_225_14, dock kan detta bero på de två försöken hade olika inspänningar. Det går inte heller att observera något samband mellan försöksalvorna svällning och deras fragmentering.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 14: Uppmätt svällning hos försökssalvorna.

Diskussion och slutsatser

Tabell 3 visar en sammanfattande översikt av resultaten. De värden som anges i Tabellen är medelvärden förde olika försöken (för spridningsdata se Figur 10). Som framgår av tabellen så finns det en betydande skillnad mellan x_{50} för salvorna S_210_11 och S_210_12 och resten av försöken. Sådan variation kan bero på att bilderna på trucklassen togs ifrån en annan vinkel än för de andra försöken. Skillnaderna i fragmentering mellan de fyra salvorna på nivå 225; S_225_11, S_225_12, S_225_13 och S_225_14, är inte lika stor i jämförelse med salvor på nivå 210. Dock är den erforderliga krossningsenergin för salva S_210_12 (6 ms mellan hålen) den lägsta bland alla genomförda försök, vilket visar att det sprängda bergmaterialet var lättare att krossa trots sitt förhållandevis stora x_{50}. Resultatet från det andra försöket med 1 ms fördröjning (S_225_11) har mer eller mindre samma krossningsenergi som referenssalva S_225_13 samt pall S_225_14 (1 ms).

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 3: Sammanfattande resultat av försökssalvor

Försök nr	Salva nr	Nominell fördröjning [ms]	Svällning [m]	X_{50} [mm]	X_{80} [mm]	Effekt på krossningsenergi [%]
1	S_210_11	42	-	498,6	906,2	25%
2	S_210_12	6	4,8	401,8	899,3	-18%
3	S_225_11	1	4,5	284,5	582,8	1%
4	S_225_12	3	5,5	211,2	471,1	-7%
5	S_225_13	42	4,8	242,8	489,5	9%
6	S_225_14	1	5,9	241,9	527,7	-2%

Till detta tillkommer detaljerade analyser av MWD-data, vilket inte redovisas i detta bidrag men kan läsas i dess helhet i den kommande slutrapporten.

Slutsatser

- Salvan med 6 ms fördröjning gav den lägsta krossningsenergin per ton malm, trots att det uppmätta medelstyckefallet var högre jämfört med övriga salvor. En förklaring till detta kan vara skalningsfel.
- För 3 ms fördröjning mellan spränghålen tyder data på något finare fragmentering, men resultatet bör verifieras genom ytterligare försök. Detta gäller även analyser av x_{80} och x_{max}.
- Styckefallet baserat på uppmätta data är dels osäkert (nivå 210) och dels är skillnaderna för små för att dra säkra slutsatser om samband mellan upptändning av salvorna och styckefallet (nivå 225).
- Krossningsenergin var vid 3 ms fördröjning högst av alla uppmätta energier i försöksserien.
- Ingen tydlig skillnad i svällning hos salvorna kunde observeras. Fördröjningstider (1-42 ms) verkar ha liten effekt på svällningen.

Fortsatt arbete

Resultaten från dessa försökssalvor visade att det krävs ytterligare försöksdata, för att kunna utvärdera effekten av korta fördröjningar, eftersom resultaten indikerar olika effekter, från styckefallet till effekten hos krossarna. Baserat på dessa resultat föreslås ytterligare utvärderingar av 3 ms respektive 6 ms fördröjningar. Till detta tillkommer observationer gjorda av personalen i gruvan gällande skut, fragmentering och lastbarhet, vilket indikerade att 1 ms fördröjning gav positiv effekt. Det rekommenderas att även för dessa försök stereografisk analys av pallar, komplett MWD-loggning, höghastighetsfilmning för att analysera massrörelser, detaljerade fragmenteringsanalyser samt vidare arbete med fördröjningens effekt på krossning.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Referenser

1. Bergman, P (2005). Optimisation of Fragmentation and Comminution at Boliden Mineral, Aitik Operation, Licentiatuppsats. 2005:90. Luleå: Luleå tekniska universitet.
2. Bjarnholt G, Skalare H (1981). Instrumented rock blasting—trials in concrete blocks. SveDeFo report DS 1981:16, Stockholm, Sverige.
3. Blair D, Minchinton A (1996). 'On the damage zone surrounding a single blasthole'. In: Mohanty B (ed) Proceedings of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam, pp 121–130
4. Chiappetta, F (2010).' Combining electronic detonators with stem charges and air decks'. Tillgänglig på http://www.iqpc.com/redForms.aspx?id=414354&sform_id=473344. Access 24 Nov 2011.
5. Johansson, D. & Ouchterlony, F (2013). 'Shock wave interactions in rock blasting-the use of short delays to improve fragmentation in model scale'. I *International Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering,* Volume 46, Nr 1, sid 1-18.
6. Katsabanis, P., Tawadrous, A. & Braun, C (2006). 'Timing effects on the fragmentation of small scale blocks' of granodiorite. Fragblast, Int J Blast Fragm 10(1–2), 83–93.
7. Nyberg, U., Harefjord, L., Bergman, B. & Christiansson, R (2005). Monitoring of vibrations during blasting of the APSE tunnel. Stockholm: Svensk kärnbränslehantering AB. (SKB rapport Nr R-05-07).
8. Ouchterlony, F, S Nie, U Nyberg & J Deng (1997). 'Monitoring of large open cut rounds by VOD, PPV and gas pressure monitoring'. I *Int J Fragmentation by Blasting* vol 1, sid 3-25.
9. Ouchterlony F, Olsson M, Bergqvist I (2001). 'Towards new Swedish recommendations for cautious perimeter blasting'. In: Marton A (ed) Proceedings of the Explo 2001. AusIMM, Carlton, pp 169–182
10. Petropoulos, N, Johansson, D, Nyberg, U, Novikov, E & Beyglou, A (2013).Improved blasting results through precise initiation – results from field trials at the Aitik open pit mine. Swebrec-rapport 2013:1. ISSN 1653-5006. Luleå Tekniska Universitet.
11. Rossmanith, H.P (2002). 'The use of Lagrange diagrams in precise initiation blasting. Part I: Two interacting blastholes'. Fragblast, Int J Blast Fragm 6(1): 104–136.
12. Rossmanith, H.P. & Kouzniak, N (2004). 'Supersonic detonation in rock mass: Part II: Particle displacements and velocity fields for single and multiple non-delayed and delayed detonating blastholes'. Fragblast, Int J Blast Fragm 8(2): 95–117
13. Schill,M (2012). Finite element simulations of blasting and the effects of precise initiation on fragmentation. Swebrec-rapport 2012:2. ISSN 1653-5006. Luleå Tekniska Universitet.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

14. Shirzadegan, S., Nordlund, E. , Nyberg, U. , Zhang, P. & Malmgren, L (2011). 'Rock support subjected to dynamic loading: Field testing of ground support using simulated rockburst'. In: Harmonising rock engineering and the environment: proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Beijing, October 18 - 21, 2011 . Qian, Q. & Zhou, Y. (eds.). Leiden: CRC Press/Balkema, p. 1269-1273 . 5 sidor.
15. Sjöberg, J (1999). Analysis of Large Scale Rock Slopes. Luleå University of Technology. Doktorsavhandling 1999:01. Luleå: Luleå tekniska universitet. 682 sidor.
16. Sjöberg, J., Schill, M., Hilding, D., Changping, Y., Nyberg, U. & Johansson, D (2012). Computer simulations of blasting with precise initiation. Rock Engineering and Technology for Sustainable Underground Construction. Eurock 2012 – the 2012 ISRM International Symposium (Stockholm, May 28–30, 2012). Stockholm: BeFo.
17. Stagg, MS, Nutting, MJ (1987). 'Influence of blast delay time on rock fragmentation: One-tenth-scale tests'. In: Surface Mine Blasting, IC 9135, US Bu. Mines, pp 79-95.
18. Stagg, MS, Rholl, SA (1987). 'Effects of accurate delays on fragmentation for single-row blasting in a 6.7 m (22 ft) bench'. In: Fourney, WL, Dick, RD (eds) Fragblast 2. Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, SEM, Bethel CT, pp 210 – 230.
19. Vanbrabant, F, Espinosa, A (2006). 'Impact of short delays sequence on fragmentation by means of electronic detonators: theoretical concepts and field validation'. In: Fragblast 8. Proc. 8th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Editec SA, Santiago, pp 326–331.
20. Wimmer, M (2012). Towards understanding breakage and flow in sublevel caving (SLC): Development of new measurement techniques and results from full-scale tests. Doktorsavhandling. Luleå tekniska universitet. 214 sidor.