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

Provsprängningar och vibrationsprognostisering, AVM – projekt Nordkalks bergtäkt, Klinthagen, Gotland

Mathias Jern, Nitro Consult AB

Sammanfattning

Ett sk AVM projekt har utförts vid Klinthagens kalkbrott på Gotand. Syftet har varit att rekommendera hur ett nytt område på lämpligast sätt kan brytas ut utan att tillåtna vibrationsvillkor överskrids. Artikeln redovisar tillvägagångssätt för metoden som sådan samt resultat från undersökning och modellering. Dessutom redovisas en metodik för optimering av sprängning med avseendet på vibrationer. I slutet på artikeln görs en jämförelse vad gäller den Monte Carlo modell som använts i projektet relaterat till konventionell regressionsanalys som metod för att prediktera vibrationer.

Inledning

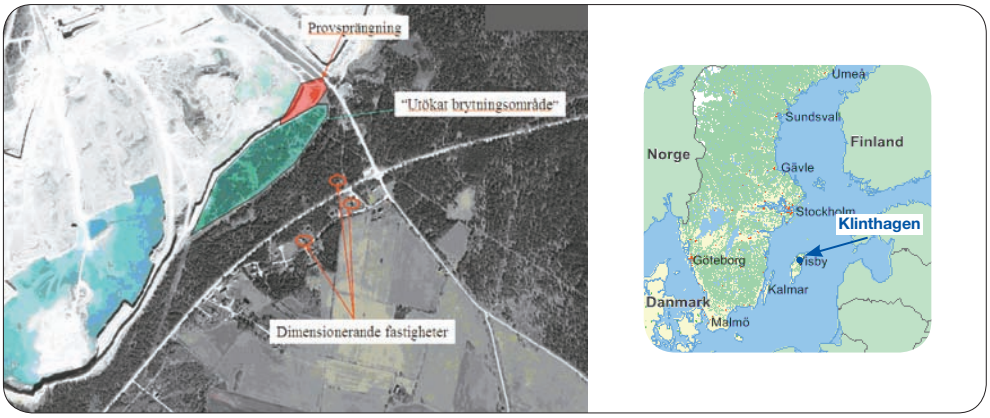
AVM (Advanced Vibration Modelling) är ett koncept för att optimera vibrationer från sprängsalvor. Idén bygger på att med modern teknik och ny kunskap kunna gå ytterligare ett steg för att modellera sprängsalvor och på så sätt kunna styra borrning, laddning, upptändning etc. för att hålla nere vibrationerna till en så låg nivå som möjligt.

Centralt i koncepten är den Monte Carlo simuleringsmodell som ursprungligen utvecklats av Dane Blair, hos Orica Technical Centre, Kurri Kurri Australien. Modellen, som beskrivs närmare i ett antal artiklar (Blair 1999, 2004, 2007) och ingår som en modul i Orica Mining Services programvara: SHOTPlus-i Pro.

Klinthagens Kalkbrott ägs och drivs av Nordkalk AB, täkten ligger på norra Gotland och producerar årligen ca 2 miljoner ton kalksten, framförallt till Stålindustrin. Inom ramen för ett projekt att utöka brytningsområdet vid kalkbrottet har ett AVM projekt genomförts. Syftet har varit att ta fram förslag på hur området på lämpigaste sätt kan brytas ut utan att man riskerar att överskrida ansökta vibrationsvillkor (4 mm/s).

Området ligger i täktens östra kant och innehåller volymmässigt ca en årsproduktion för bergtäkten. Denna bergvolym är en förutsättning för att Nordkalk skall kunna upprätthålla sin verksamhet på Gotland innan brytning i den planerade Bungetäkten kan påbörjas. Området ligger förhållandevis nära omgivande bebyggelse (flera hus kommer som närmast att befinna sig på ca 200 m avstånd från brytningen). Redan innan provsprängningarna påbörjades togs därför beslutet att minska håldiametern till 76 mm samt att skjuta varje rad för sig. Vid 12 m pallhöjd innebär detta laddningsmängder kring 50 kg SME-sprängämne per hål.

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



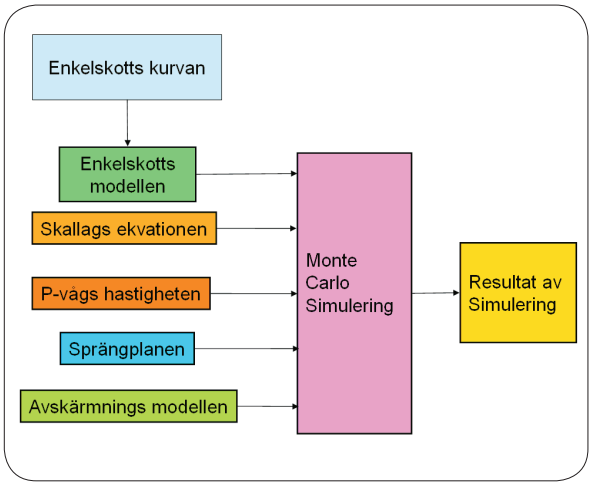
Figur 1. Inringade områden visar platser för de hus som undersökningen fokuserats på.

Provsprängningar utfördes strax utanför det aktuella området, mätningar har sedan gjorts i omgivningen med fokus på tre hus, de som ligger sig närmast det aktuella området (se figur 1). Dessa tre hus kan ses som dimensionerande vad gäller sprängningsinducerade vibrationer.

Monte Carlo simuleringsmodellen

Skillnaden mellan Monte Carlo modellen och det sätt man traditionellt beräknat vibrationer från sprängning (med hjälp av skallagsekvationen) är framförallt att man i denna modell tittar på frekvensinnehåll, varaktighet och ankomsttider för vibrationerna. På detta sätt kan man modellera vibrationerna från sprängsalvan beroende på tändplanernas utformning.

Modellen utgår från så kallad Monte Carlo simulering, dvs. man inkluderar en variabilitet i de parametrar som inte helt kan bestämmas, på grund av geologiska variationer, spridning i sprängkapslarnas tidsfördröjning etc. och kör sedan modellen många gånger för att beräkna en sannolikhetsfördelning. Modellen är även en superpositionsmodell. Resultaten räknas fram genom att summera påverkan från flera olika del- eller borrhålsladdningar som har liknande



Figur 2, blockdiagram över Monte Carlo simuleringsmodellen.

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

vibrationspåverkan men varierar i tid och plats i salvan. Man använder en enkelskottskurva vilken ger information om hur vågen förändras beroende på det medium den transporteras genom mellan platsen för detonationen och mätpunkten, Enkelskottskurvans egenskaper är ett ”fingeravtryck” som i sig innehåller information om de geologisk parametrar som styr vibrationens egenskaper. Indata för att kunna utföra modelleringen är sammanfattade i figur 2.

Enkelskottskurvan

Genom att mäta upp vågformen från ett enkelskott kan man bestämma platsspecifika förhållanden. Effekten av flera skott kan sedan beräknas med hjälp av superposition. Metoden att med enkelskottskurvor och superposition beräkna vibrationer får idag ses som etablerad, se Spathis (2009) och Anderson (2008).

Skallagsekvationen

Skallagsekvationen är den vanligaste metoden för att beräkna vibrationer med avseende på laddningens storlek och avstånd. I Monte Carlo modellen är den dock enbart ett delmoment (om än ett viktigt sådant). Ekvationen skrivs:

$$v_{\max} = A \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{q}} \right)^{-B}$$

Parametern: $\left(\frac{r}{\sqrt{q}} \right)^{-B}$ kallas ofta SD (skaldistansen)

Där v_{max} = max svängningshastighet (mm/s)
r = avstånd mellan samverkande laddning och mätpunkt (m)
q = samverkande laddning (kg)
A = platsspecifik konstant
B = platsspecifik konstant

Skallagekvationen bestäms normalt via regressionsanalys där man med hjälp av kurvpassing bestämmer ekvationens konstanter samt hur bra passformen mot indata är.

P-vågshastigheten

För att kunna beräkna effekten av att flera olika borrhålsdetonationer påverkar en viss punkt på ett korrekt sätt måste tidsaspekten inkluderas. Förutom fördröjningen mellan laddningarna har tiden som vibrationen transporterar sig genom marken stor betydelse. För att kunna bestämma denna måste gånghastigheten i mark bestämmas.

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

Sprängplan

Information om position, antalet hål, laddningsmängd i varje hål, laddningsgeometri och tändsystem etc. definieras tillsammans i en borr-, ladd- och tändplan som sedan används i modellen.

Avskärmningsmodellen

Beroende på vilken del av salvan, eller vilken borrhålsladdning, som initieras kan vibrationsutbredningen till omgivningen styras. Det vill säga en slags vibrationsdämpande ”skärm” skapas, denna effekt kallas avskärmning (se Blair, 2007) och inkluderas i beräkningen.

Kalibreringsprocessen

För att optimera precisionen i modellen måste man kalibrera den för att inte vibrationsnivåerna skall överskattas. Kalibreringen innebär att man skjuter hela salvor och jämför resultatet med modelleringsresultaten. Den parameter som framförallt måste kalibreras är A-parametern, orsaken till detta är i stor omfattning att man i försöken skjuter ”bomskott” vilket oftast ger högre vibrationsnivåer än vid ”normala” sprängsalvor.

Utformningen av försöken

För att samla in data till modellen sköts sammanlagt 17 enkelskott vid tre olika tillfällen. Dessutom sköts fem kalibreringssalvor. Syftet med kalibreringssalvorna var att finjustera modellen samt att kontrollera att de beräkningar som utförs är en god approximation av verkliga vibrationsförhållanden.

Vid ”huvudförsöket” sköts 10 enkelskott, vibrationerna från dessa mättes sedan upp i 11 olika mätpunkter. Detta för att noggrant mäta upp hur vibrationerna ser ut beroende på avstånd och laddningsmängd samt ge underlag för att beräkna gånghastigheter. Vid övriga 7 enkelskott samt vid de 5 kalibreringssalvorna mättes vibrationer enbart på de dimensionerande byggnaderna. Vibrationsmätningar utfördes på avstånd mellan 18 m och 800 m från sprängningarna.

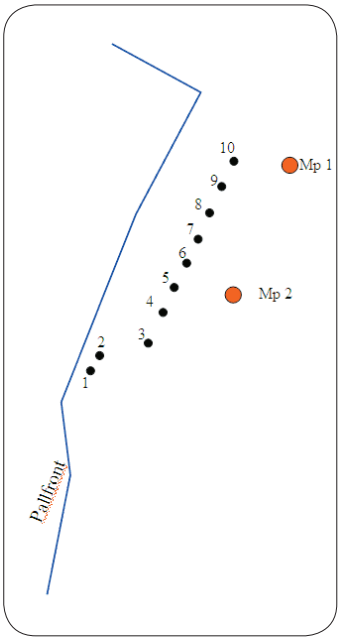
Laddningen i hålen varierades från fulladdade hål ned till 75 %, 50 % och 25 % av maximal laddningsmängd. Dessutom användes två olika sprängämnen SME (emulsionssprängämne) och Fordyn (dynamitsprängämne).

Laddningen för varje hål listas i tabell 1. Hålens position kan ses i figur 3 och 4. Position på mätpunkterna syns i figur 4. Av de tio enkelskotten sköts två med normal försättning och resterande 8 utan utslag alls (bomskott).

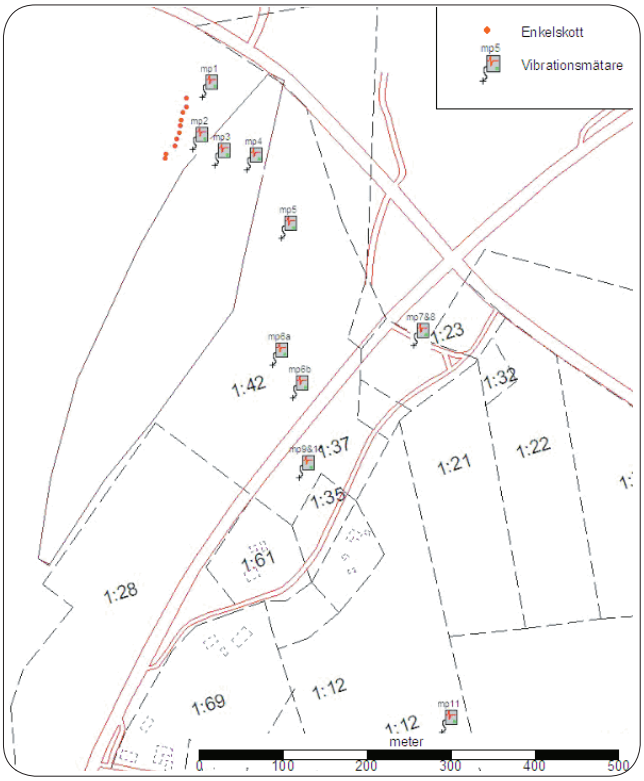
© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 1

Skott nr	Laddning (kg)	Sprängämne
1	52	SME + 2 kg boost
2	52	SME + 2 kg boost
3	45	Fordyn
4	39,5	SME + 2 kg boost
5	52	SME + 2 kg boost
6	12,5	Fordyn
7	39,5	SME + 2 kg boost
8	27	SME + 2 kg boost
9	52	SME + 2 kg boost
10	27	SME + 2 kg boost



Figur 3. Placering av enkelskott, nr 1 och 2 med normal försättning medan 3–10 sköts utan utslag (planskiss). Bilden skall ses som en detalj ur bild 4.



Figur 4. Provsprängning: 10 enkelskott sköts och registrerades i 12 mätpunkter, mp 1–11 (inkl 6 a & b).

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

Kalibreringssalvorna

Förutom de 17 enkelskotten som sköts för att bygga upp själva modellen sköts också 5 hela sprängsalvor för att kalibrera modellen. Dessa salvor användes både för själva kalibreringen samt till att testa om vibrationerna kunde minskas med hjälp av de beräkningar som kan göras utifrån själva modellen. En kort sammanfattning av de fem salvorna kan ses i tabell 2.

Tabell 2.

Salva	Antal hål	Max Samv. Ladding (kg)	Total Laddning (kg)	Fördröjningstider (ms)	Tändsyst	Anm.
1	20	56	1100	42	Nonel	
2	7	56	390	42	Nonel	
3	26	55	1325	35	I-kon	
4	27	31	1350	35* & 17**	I-kon	2 deck
5	23	30	1150	70* & 35**	I-kon	2 deck

**tid mellan hål.*
*** tid mellan deck (övre deck först).*

Resultat från provsprängningarna

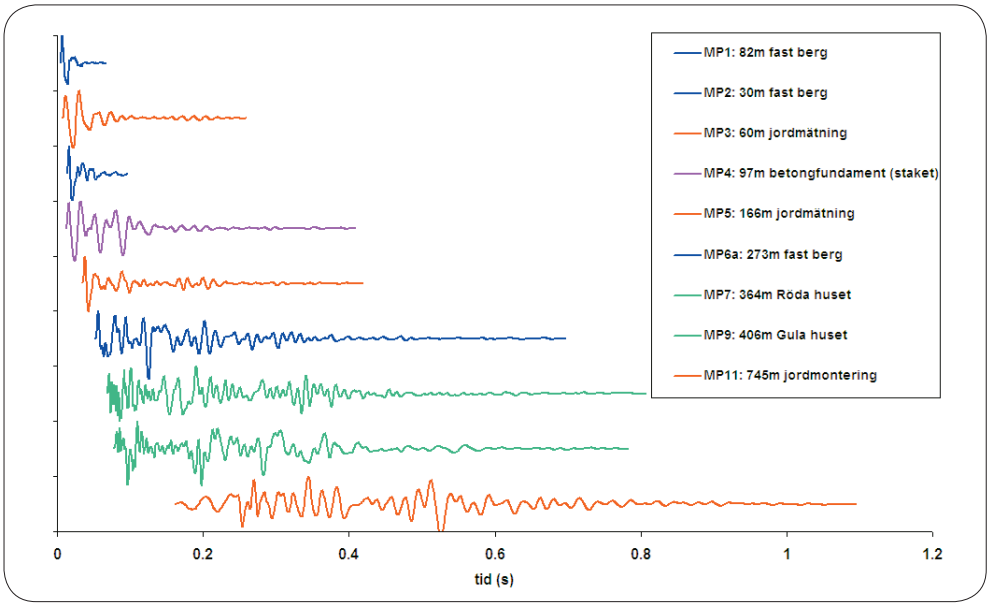
Enkelskotten

Det är av avgörande betydelse att man mäter enkelskottskurvan på samma plats som man skall utföra modelleringen på, eftersom den påverkas mycket av hur långt vibrationen färdats mellan detonation och mätplats (får längre varaktighet och lägre frekvensinnehåll) men också pga. egenfrekvenser i de konstruktioner eller strukturer man mäter på, exempel på hur stor variationen är kan ses i figur 5.

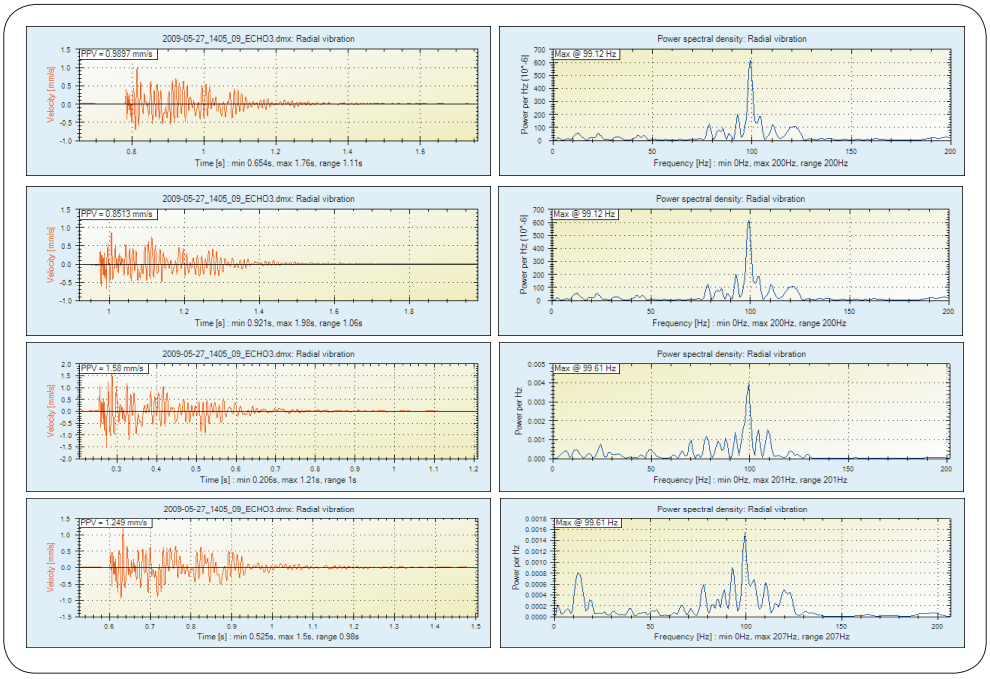
Förutsättningen för att man skall kunna använda sig av enkelskottskurvan är dock att den är förhållandevis likartad mellan skott som registreras på samma plats. I figur 6 visas, som exempel, fyra av enkelskotten.

Som framgår är de fyra kurvorna mycket lika både vad gäller form, varaktighet och frekvensinnehåll. Man kan dock notera att kurvorna inte är helt identiska, i modelleringen utförs en viss randomisering i utseendet på enkelskottskurvan för att kompensera för detta.

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



Figur 5, enkelskottskurvan för 9 av mätpunkterna i undersökningen. Plats för mätare och avstånd till sprängladdning ses i figuren. Kurvorna är normaliserade med avseende på svängningshastighet, dvs. vi ser enbart vibrationernas form och varaktighet i tid på respektive plats.

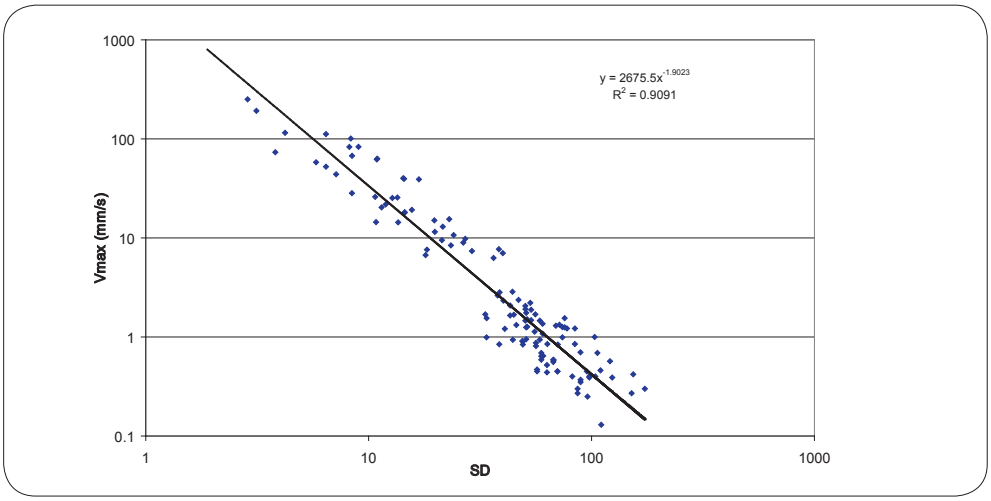


Figur 6, exempel på fyra enkelskottskurvor med frekvensanalyser, mp 7.

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

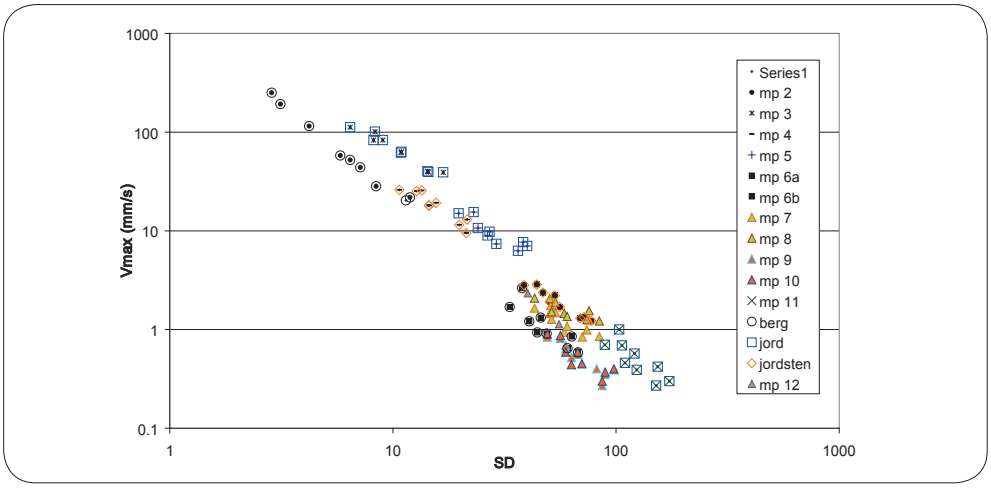
Regressionsanalys skallagsekvationen – ”Alla data”

I figur 7 görs en kurvpassning mellan maximal svängningshastighet (vmax) och skaldistansen (SD) för samtliga uppmätta data. Lutning och position på linjen ger sedan de ingående parametrarna A och B i skallagsekvationen. Korrelationskoefficienten (R=0,95) innebär dessutom att passningen är mycket bra.



Figur 7. Samtliga data från provsprängningarna

Det faktum att punkterna i diagrammet kommer från olika platser och undergrundsförhållanden, samt att enkelskotten skjutits med olika sprängämnen och förutsättningar innebär att det finns anledning att betrakta data noggrannare. I figur 8 är samma data som i figur 7 plottade, men vi har märkt ut vilka mätpunkter data kommer från och huruvida de är monterade på berg, i jord eller på ”jordsten”. Man kan tydligt se att resultatet är beroende av undergrund.



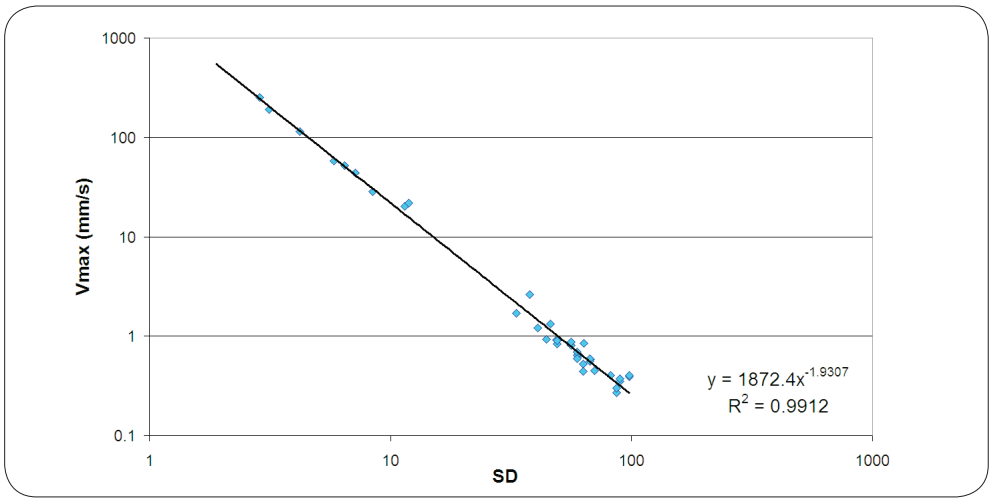
Figur 8. Samtliga resultat, mätpunkt och undergrund har plottats tillsammans.

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

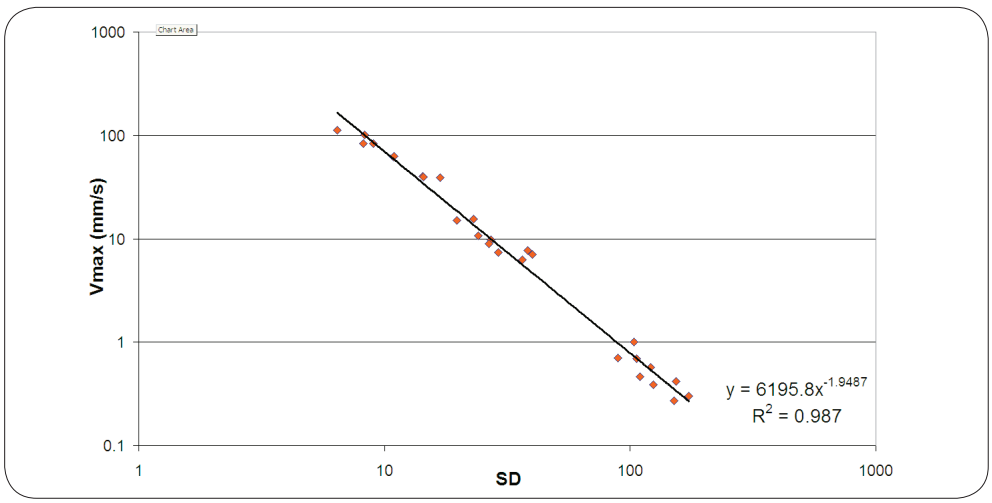
Regressionsanalys – Betydelsen av undergrund

Om man betraktar figur 8 är det tydligt att jordpunkterna placeras högre än bergpunkterna i diagrammet (dvs. vibrationerna är högre i jord än på berg om avstånden är de samma). Detta ger oss anledning att dela upp berg för sig och jord var för sig, vilket redovisas i figur 9 respektive 10. Vad som tydligt kan ses är att korrelationskoefficienten blir ännu högre vilket visar på markant responsskillnad beroende på undergrund.

Korrelationskoefficienten för berg blir 0,996 vilket naturligtvis är extremt bra. De båda linjerna är dessutom nästan helt parallella vilket gör att man kan anta att regressionslinjer för andra marktyper borde ha samma lutning.



Figur 9, undergrund berg.



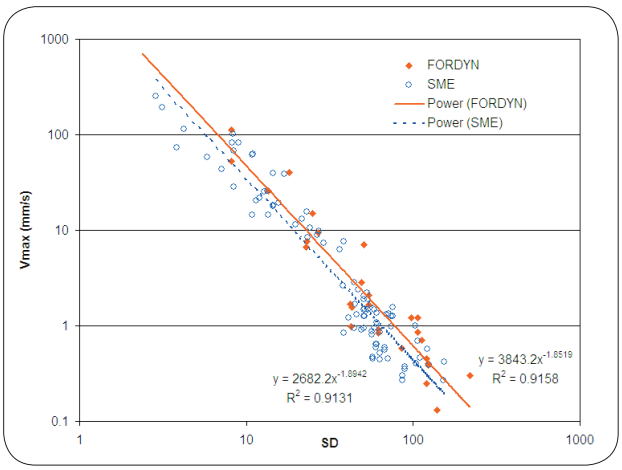
Figur 10, undergrund jord.

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

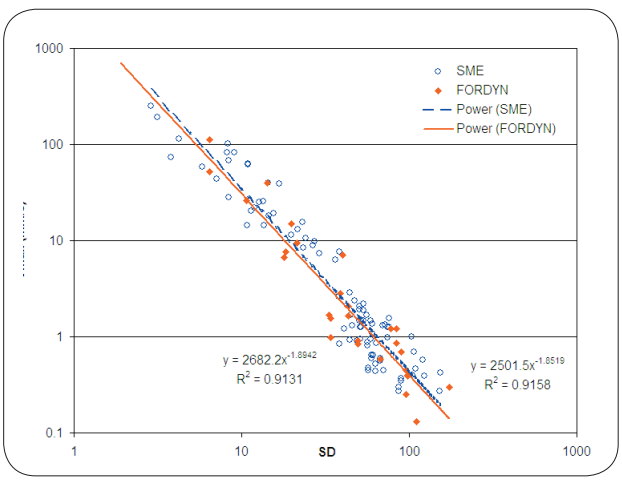
Regressionsanalys – Betydelsen av olika sprängämne

I produktionssprängningar vid Klinthagens bergtäkt används normalt sett SME (Site Mixed Emulsion) som sprängämne. SME blandas på plats och fylls via slang direkt i borrhålen. Vid de provsprängningar som utfördes kunde dock inte SME användas vid samtliga hål, orsaken till detta var att det inte går att ladda små laddningar (<25 kg) med precision. Till de mindre laddningarna användes därför ett dynamitsprängämne (Fordyn). För att kontrollera att de två sprängämnena gav liknande effekt fullladdades dessutom hål ett med Fordyn för jämförelse. Vibrationsresultatet för de två sprängämnena visas i figur 11.

Som kan ses ger sprängämnet Fordyn betydligt högre vibrationer än SME. För att kompensera för denna skillnad beräknas Fordyn om till SME-ekvivalent via begreppet viktstyrka (se Persson m.fl., 1993.). Resultatet av detta blir att varje kg Fordyn multipliceras med 1.59 och kan då plottas som ”SME-ekvivalent”. Detta gav upphov till figur 12, som ses plottar de två kurvorna då nästan helt lika.



Figur 11, jämförelse mellan SME och Fordyn ”kg för kg”.



Figur 12, jämförelse mellan SME och Fordyn m a p viktstyrka.

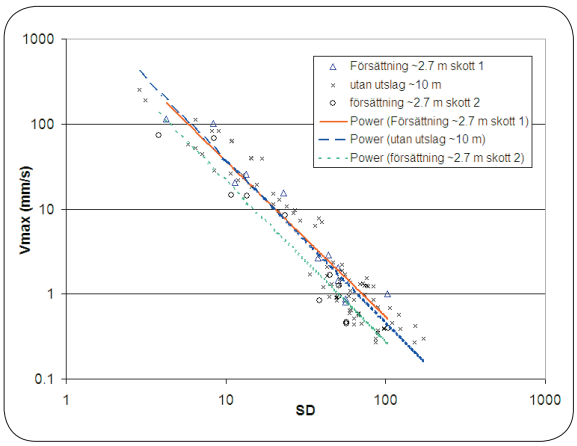
© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Regressionsanalys – Betydelsen av försättning

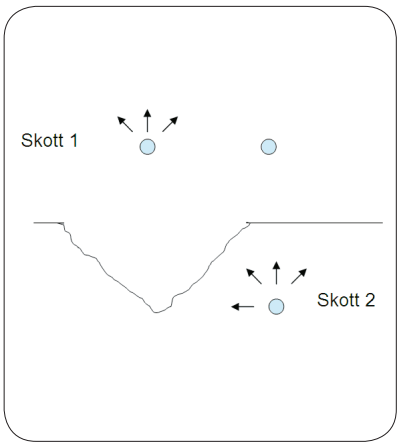
Två av enkelskotten sköts med normal försättning (se figur 3), tanken med detta var att få en uppfattning om vilken skillnad det var att skjuta skott som ”vanligt” med konventionell försättning eller att skjuta bomskott.

Vibrationen från de två skotten jämfört med de övriga plottas i figur 13. Vad som kan noteras är att skott 1 uppvisar i princip samma vibrationsnivå som de övriga skotten medan skott 2 ger betydligt lägre värden. Orsaken till detta kan vara de olika förutsättningarna som dessa detonationer har haft (se figur 14). Skott 1 har skjutits mot en fri yta med en konstant försättning framåt. Vid skott två är omgivningen förändrad, den fria ytan ser helt annorlunda ut och man kan misstänka att uppsprickning från föregående skott kan påverka även skott 2.

Tidigare undersökningar har pekat på att försättningen inte påverkat vibrationerna (Blair & Armstrong, 2001). Det är dock sannolikt att påverkan på omgivningen i form av sprängskada och sprickbildning gör det. Detta är också förklaringen till att modellen kalibreras med avseende på A-parametern.



Figur 13, test försättning



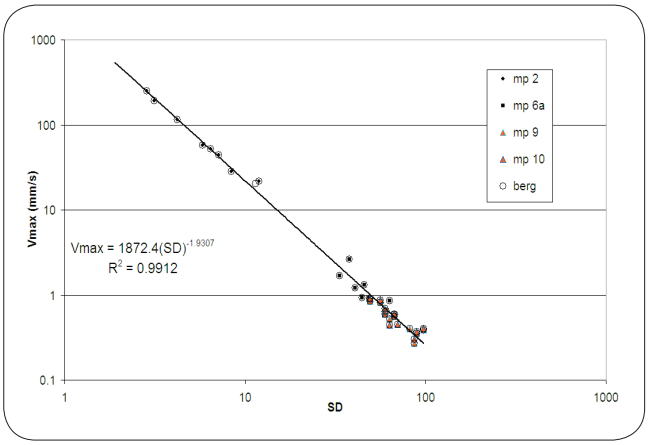
Figur 14, exempelbild skott 1 och 2

Regressionsanalys – Dimensionerande byggnader

Fokus i undersökningen har varit de tre hus som är belägna närmast undersökningsområdet. Dessa tre hus har benämnts med det mätpunktsnummer som tilldelats dem. Mp 7 och mp 8 har suttit på fastigheten Lilla Takstens 1:20, mp 9 och mp 10 har suttit på fastigheten Stora Källstäde 1:35 och mp 12 som har varit monterad på Stora Källstäde 1:36, se figur 4.

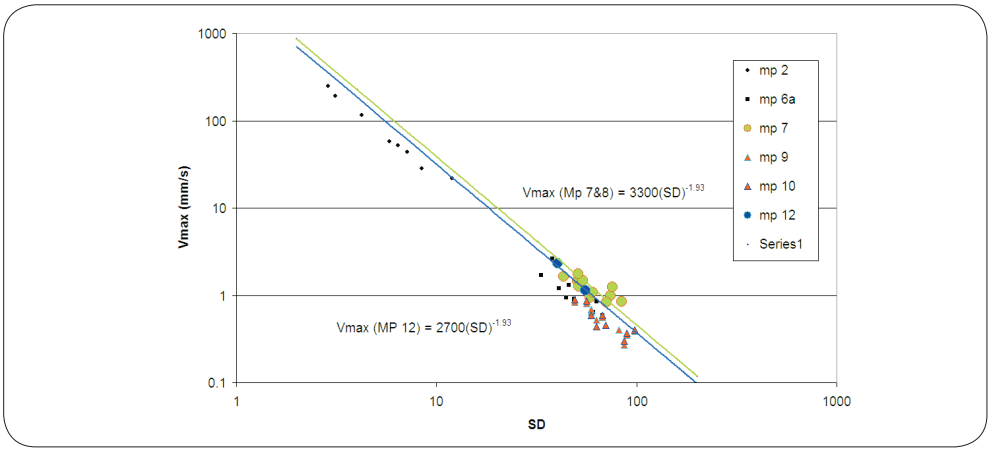
Då ingen av dessa hus haft en respons som är exakt lika de övriga, har tre olika skallagsekvationer använts. Enklast av dessa tre har varit mp 9 & 10 som uppvisat en vibrationsnivå som helt samstämmer med de övriga punkter som monterats på berg. Detta innebär att man kunnat skapa en mycket samstämmig bild av förväntade vibrationsnivåer, se figur 15.

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



Figur 15, diagrammet är det samma som för bergpunkter (figur 9), mp 9 & 10 plottar perfekt i detta diagram.

När det gäller mp 7 & 8 och mp 12 är det lite mer komplicerat. Som kan ses i figur 8 plottar dessa punkter mitt emellan jord och berg. För att få en ekvation som anpassas till dessa punkter lånar vi lutningen från mp 9 & 10. Eftersom linjerna för berg och jord är helt parallella finns det ingen anledning att misstänka att punkter som hamnar mittemellan dessa inte skulle plotta även mittemellan dessa även på andra avstånd! Vi väljer därför att parallellförflytta linjen till att passa mp 7 & 8 och mp 12, se figur 16. Skallagsekvationerna för respektive mätpunkt kan ses i figurerna.

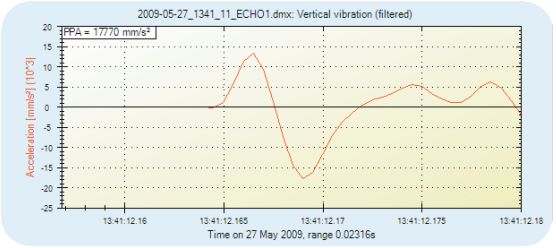


Figur 16, diagrammet visar de använda regressionslinjerna för mp 7 & 8 respektive mp 12.

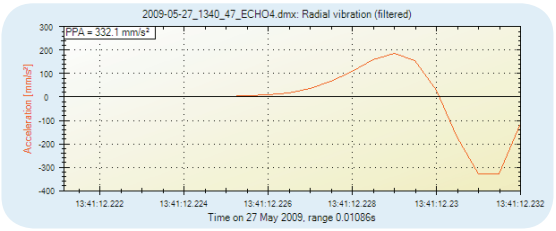
© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

P-vågshastigheten

Vid provsprängningarna användes bland annat instrument med GPS-synkroniserad klocka (Kelunji ECO Pro från ES&S). Detta innebär att klockan i instrumentet kontinuerligt uppdaterar sig via satellit mot en atomklocka och noggrannheten på tidmätningen är garanterad till 0,1 mikrosekund. I figur 17 och 18 visas klockslaget när vibrationsvågen nådde mp 1 respektive mp 9 vid skott 1. Som kan ses var tidsdifferensen här 61 ms. Eftersom vi känner mätarnas position så vet vi att skillnaden i längd innan vågen möter mätaren mellan de två punkterna är 324 m. Om vågen färdas 324 m på 61 ms är gånghastigheten ca 5 300 m/s.



Figuren 17 visar först ankommen våg vid mp 1 och skott 1, klockan är: 13:41:12,164



Figur 18 visar först ankommen våg vid mp 9 och skott 1, klockan är: 13:41:12,225

Kalibreringssalvor

Resultat modellbygget

Modellbygget handlar i huvudsak om en iterativ process, indata från enkelskotten används men i viss mån måste dessa ändras för att inkludera de parametrar som har med den faktiska salvan att göra. I huvudsak är det parametern A som används i kalibreringen, genom att skjuta utan normalt utslag får man ett slags maxvärde som måste anpassas för att gälla verkliga förhållanden. I modelleringen används samtliga nedanstående parametrar (tabell 3) samt enkelskottskurvan.

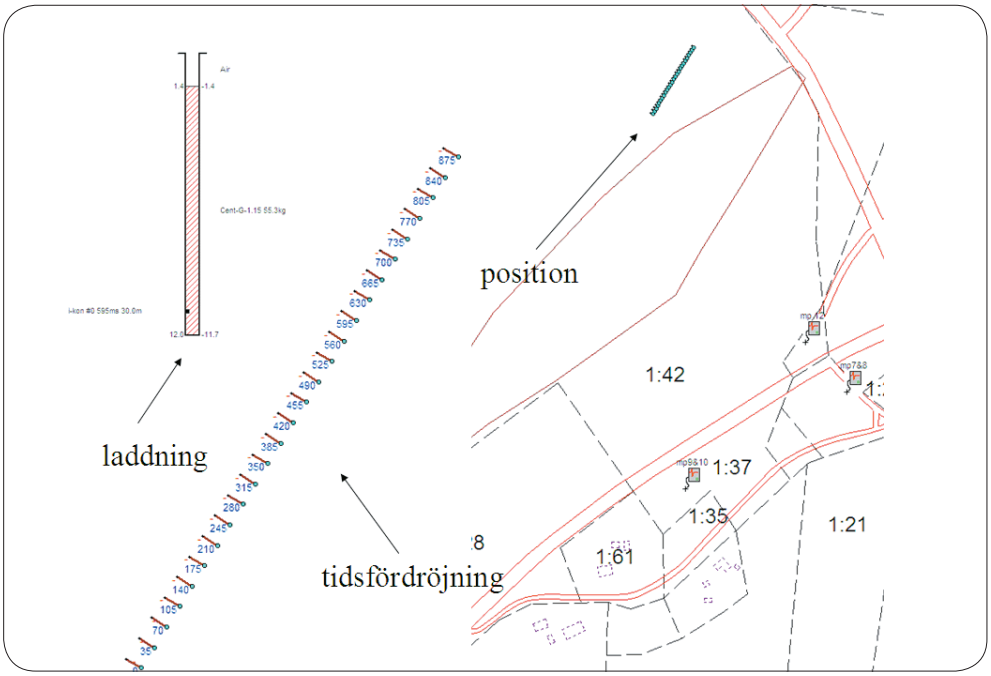
Tabell 3, samtliga parametrar som används i modellen. Alla parametrar i nedanstående tabell är framräknade utom A (använd) som bestäms i själva kalibreringsprocessen.

	Mp 7–8	Mp 9–10	Mp 12
A (beräknad)	3300	1875	2700
A (använd) (75% av A(beräknad))	2475	1410	2025
B	1,93	1,93	1,93
vp	5300	5300	5300
COV*	0.25	0.15	0.25

** COV (coefficient of variation) används för att beskriva spridningen av data i regressionsanalysen*

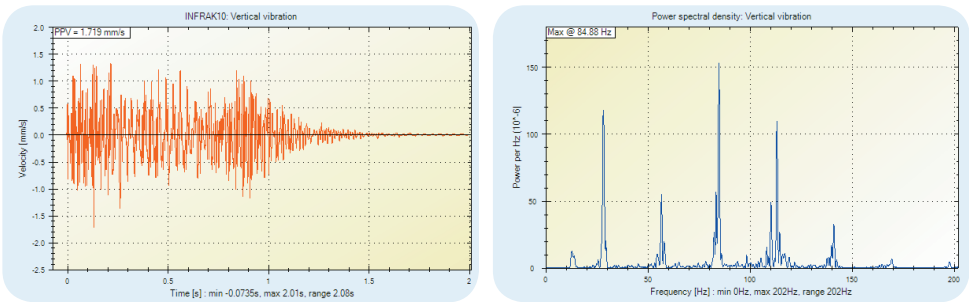
© 2010, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Nedan visas ett exempel på körning av modellen, från kalibreringssalva 3. Indata är sprängplan (figur 19), enkelskottskurva (se figur 6) samt parametrarna i ovanstående tabell 3.



Figur 19. Kalibreringssalva 3

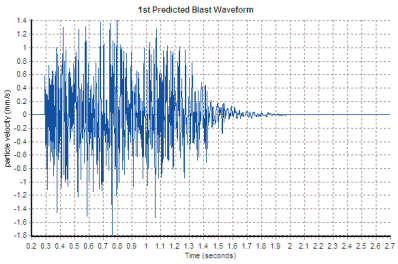
Det verkliga resultatet från sprängningen ses i figur 20, detta resultat jämförs sedan med simulerat resultat. Eftersom modellen är baserad på sannolikheter modelleras salvan många gånger och resultatet fås sedan som en statistisk fördelning.



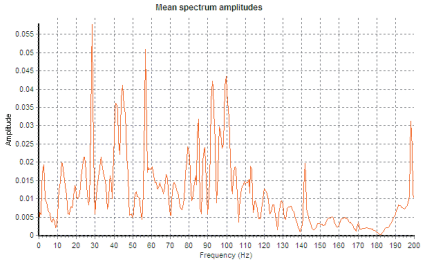
Figur 20, tidsförlopp och frekvensanalys för mp 8 vid kalibreringssalva 3. v_{max} = 1.72 mm/s.

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

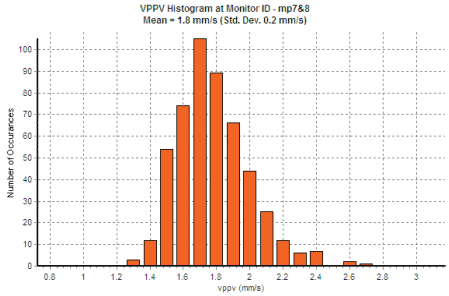
Som resultat av modelleringen fås ett v_{max} med tillhörande fördelning men man kan också undersöka kurvans tidförlopp, frekvensinnehåll etc., se figur 21.



Tidsförloppet i en simulering



Frekvensanalys, medelvärde för 500 stimuleringar



Spridningen (v_{max}) vid 500 simuleringar av kalibringsalva 3, medel = 1.8 mm/s.

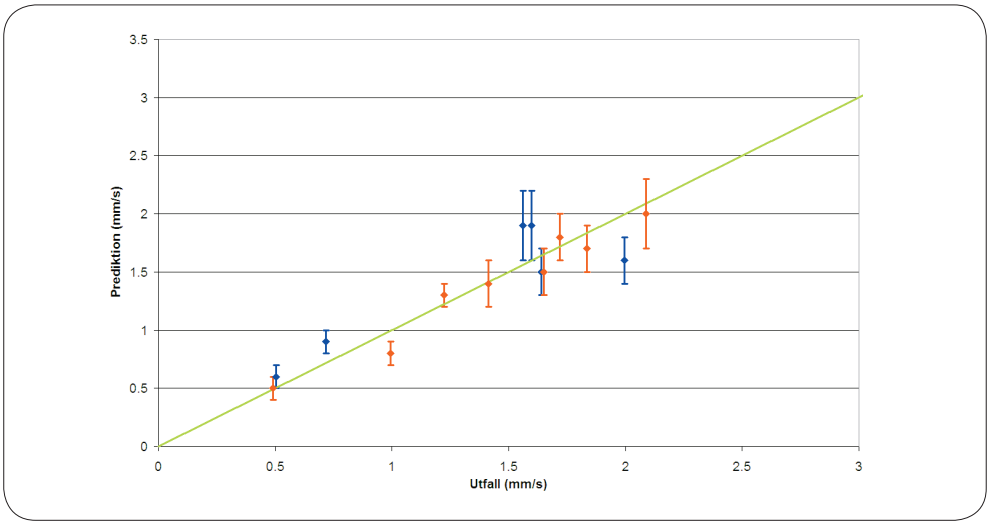
Figur 21, dessa data kan sedan jämföras med de verkliga resultaten i figur 20

Resultat från kalibreringen

Hur bra den modell är som vi skapat kan bestämmas genom att jämföra den uppmätta vibrationen i varje mätpunkt för varje kalibreringssalva med den beräknade nivån i samma punkt. Sammanlagt 5 kalibreringssalvor mättes på 3 platser, detta gav sammanlagt 14 mätdata (en punkt saknas vid ett sprängtillfälle).

I diagrammet (figur 22) plottas det beräknade värdet inkluderat en standardavvikelse (på y-axeln) mot det uppmätta värdet (x-axeln). Detta innebär att om den gröna linjen i diagrammet korsas av ”felstaplarna” för de beräknade värdet så var utfallet inom en standardavvikelse från det beräknade. Rent statistiskt skall 68 % (+/- en standardavvikelse) av alla händelser vara inom en standardavvikelse från det beräknade värdet. Följaktligen så kan man konstatera att modellen fungera mycket bra: i figuren ser vi att 4 av 14 mätningar är utanför en standardavvikelse (29 %), dvs. 71 % av observationerna är inom en standardavvikelse från beräknat värde.

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



Figur 22. Resultat från kalibreringssalvorna. Diagrammet jämför uppmätta värden (x-axel) mot beräknade värden (y) axeln. Blå symboler gäller för Nonel salvor och röda för I-kon. "Felstaplarna" indikerar +/- en standardavvikelse i beräkningsresultatet.

När vi nu har konstruerat en fungerande modell kan vi använda denna för att simulera effekten av olika åtgärder och bestämma hur man på ett bra sätt skall kunna spränga ut volymen optimalt.

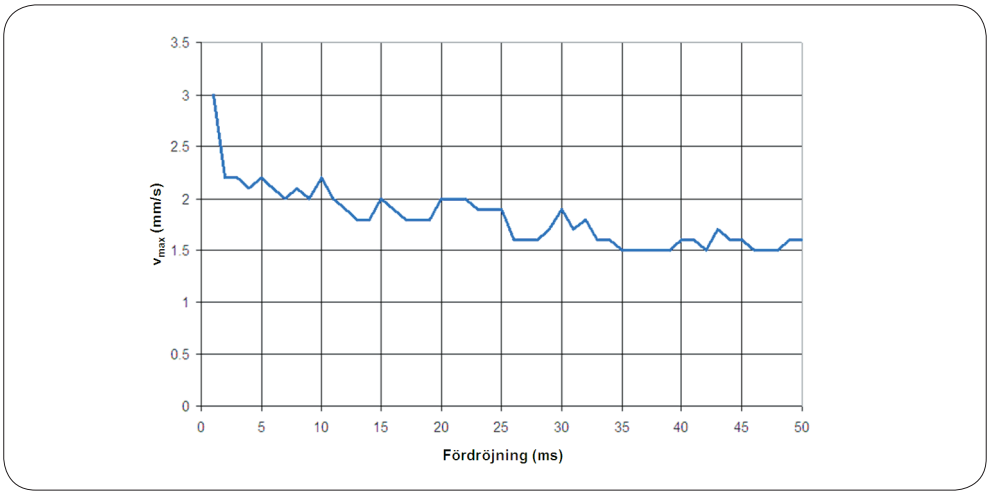
Användning av modellen

Det vi först kan använda modellen till är att utreda hur stor effekten kan bli av förändringar i borr-, ladd- och tändplaner samt brytningsriktning. Denna artikel fokuserar enbart på de mätpunkter som ansetts som mest kritiska för verksamheten det vill säga mp 7 & 8.

Fördröjningstider

Figur 23 visar betydelsen av fördröjningstider, i ett antal simuleringar kördes kalibreringssalva 3 med fördröjningstider mellan 1 och 50 ms (de simulerade laddningarna var något mindre än i den verkliga salvan). Diagrammet visar dels att 35 ms är den kortaste fördröjningstid där man kan förvänta sig ett medelvärde på 1.5 mm/s. Man kan också notera att man behöver mer än 10 ms fördröjning för att komma ner under 2 mm/s som medelvärde.

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

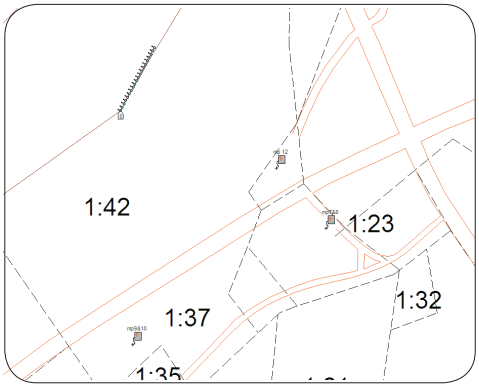


Figur 23, genom att modellera samma salva med olika fördröjning kan man söka optimala fördröjningstider.

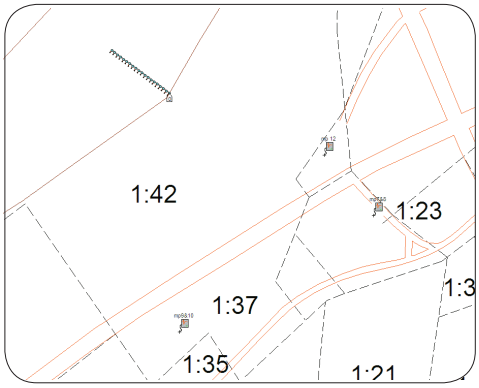
Brytningsriktning

Brytningsriktningen har en viktig betydelse för resultatet. Nedan visas simulering av två salvor som skjuts inom området, så nära de dimensionerande husen som är möjligt. I det första läggs borrplanen längs med områdesgränsen (figur 24) medan i det andra fallet vinklar vi upp salvan till att ändra vinkel med 90° (figur 25). Denna manöver gör vi för att utnyttja effekten av avskärmning. I den första sprängplanen finns ingen avskärmning medan i den andra sprängplanen detonerar det närmaste hålet först och skapar då en zon av skadat eller fragmenterat material, som leder vibrationer sämre i riktning mot dimensionerande mätpunkter.

Om vi nu simulerar att vi skjuter borrhålen fulladdade (50 kg SME + booster) så kan vi sedan betrakta resultatet, när 35 ms fördröjning används.



Figur 24. Simulering, brytningsriktning 1. Avstånd från salva till mp 7 & 8 ca 215 m.



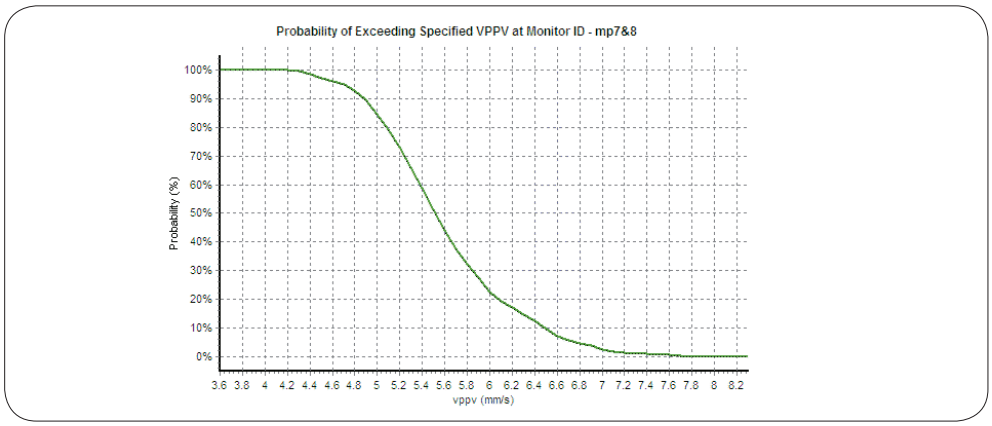
Figur 25. Simulering, brytningsriktning 2. Avstånd från salva till mp 7 & 8 ca 215 m.

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

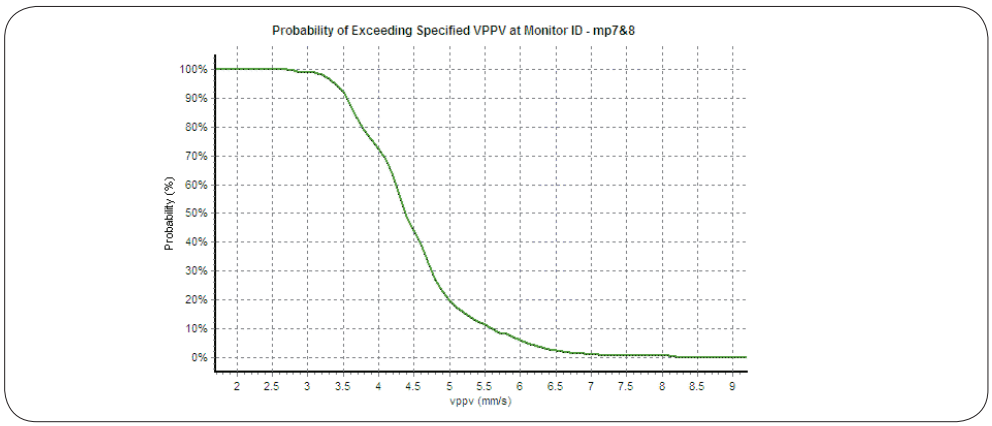
I mp 7 & 8 kan vi notera att vibrationerna blir betydligt lägre om vi spränger med en riktning från den aktuella mätpunkten, vi kan också konstatera att vi oberoende av sprängriktning med stor sannolikhet kommer att överskrida 4 mm/s. Sannolikheten för att gå över 4 mm/s är 100 % vid brytningsriktning 1 (figur 26) och när vi byter brytningsriktning så reducerar vi denna sannolikhet till 70 % (figur 27).

Eftersom tidsfördröjningen och sprängningsriktningen får anses optimerad, så finns det endast två realistiska sätt att ytterligare minska vibrationsnivån. Antingen minskar man laddningen eller så ökar man avståndet.

För att kontrollera hur långt avstånd man behöver för att kunna använda fulladdade hål så kan vi flytta salvan mot väst tills vi träffar på en plats där vi med mer än 90 % sannolikhet understiger 4 mm/s.



Figur 26. Brytningsriktning 1 (figur 24) mp 7&8, 215 m avstånd. Sannolikheten att överstiga 4 mm/s är 100 %, medelvärdet är 5,5 mm/s.

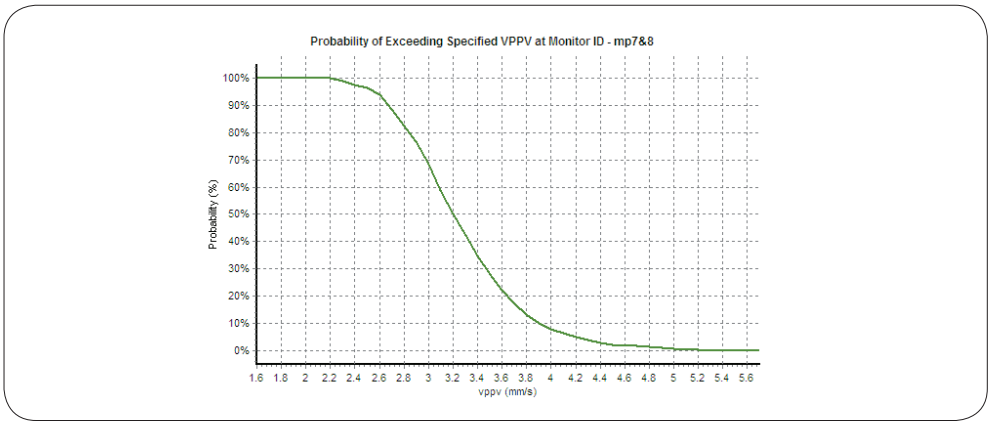


Figur 27. Brytningsriktning 2 (fig. 25) mp 7&8, 215 m avstånd. Sannolikheten att överstiga 4 mm/s är 70 %, medelvärdet är 4,3 mm/s.

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

Minsta avstånd

Resultatet från en sådan modellering syns i figur 28. Om avståndet till mp 7&8 ökas till 255 m minskar risken för vibrationsnivåer över 4 mm/s till ca 8 %. Detta förutsätter att tändplanen är optimerad enlig tidigare beskrivning.Placeringen på denna salva visas i figur 29, i figuren visas även ett rastrerat område inritat i det aktuella området. Detta område är det område som bedöms som problematiskt att ta ut om man skall innehålla villkoret 4 mm/s.



Figur 28. Mp 7&8, 255m avstånd. Sannolikheten att överstiga 4 mm/s är ca 8 %, medelvärdet är 3,2 mm/s.

Placeringen på denna salva visas i figur 29, i figuren visas även ett rastrerat område inritat i det aktuella området. Detta område är det område som bedöms som problematiskt att ta ut om man skall innehålla villkoret 4 mm/s.

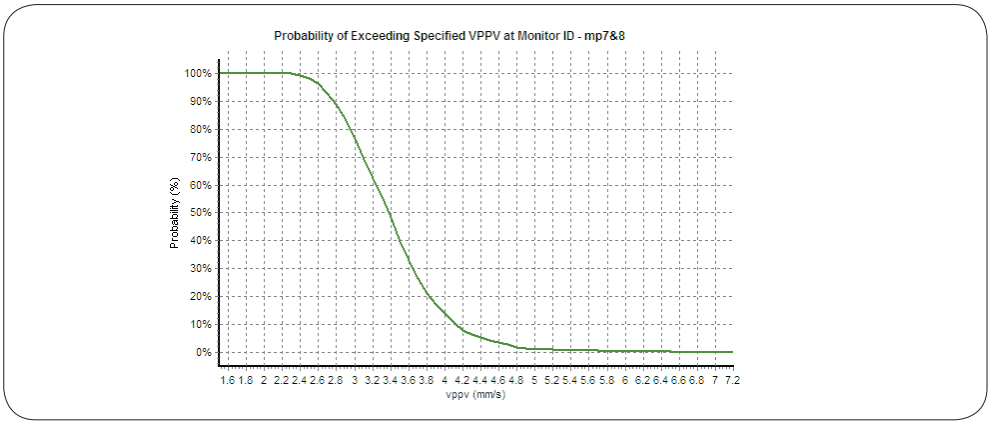
Initieringssystem

De modelleringar som redovisats tidigare i detta kapitel är samtliga utförda med elektroniska tändare (I-kon). Det absolut vanligaste tändsystemet är dock det pyrotekniska (Nonel). En viktig fråga är ju då hur stor skillnad det är mellan ett elektroniskt och ett pyrotekniskt tändsystem när det gäller förväntade vibrationsnivåer.

Figur 29. Det rastrerade området visar på delar av området som kan bli svåra att ta ut med fulladdade hål och villkor på 4 mm/s. Själva salvan är utritad med prickar.

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

I figur 30 finns exempel från modellering av en salva skjuten med Nonel tändare istället för I-kon tändare. Salvan är identisk med den salva som beskrivs i figur 28 och 29. Skillnaden är att i fallet I-kon har 35 ms mellan hålen använts. Gällande Nonel är fördröjningstiden istället 42 ms mellan hålen (samt U 475 i botten).



Figur 30. Mp 7 & 8, 255m avstånd. Risken att överstiga 4 mm/s är ca 13 %, medelvärdet är 3,4 mm/s (Nonel tändare).

Vid jämförelse kan vi se att skillnaderna är förhållandevis små. Medelvibrationsnivån stiger från 3,2 till 3,4 mm/s (6 %) och risken att överskrida 4 mm/s ökar från 8 % till 13 % (gäller mp 7 & 8). Det är tveksamt om det är värt att byta tändsystem för denna vinstmarginal.

Med större salvor och mer komplicerade tändplaner kommer dock vinsten att bli betydligt större.

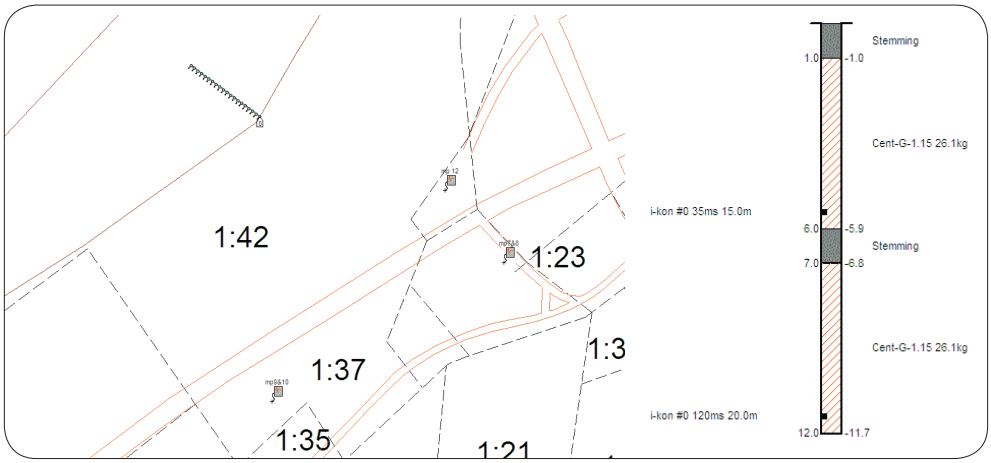
Delladdning

Om man inte kan flytta salvan bakåt för att minska vibrationsnivån är alternativet att minska vibrationsnivån genom att minska laddningen per detonation. Detta kan göras på olika sätt. Det alternativ som använts här är sk. delladdning eller deckladdning. Denna metod innebär att man delar av laddningen i borrhålet med en gruspropp på mitten, på så sätt kan man skjuta hålet med två separata laddningar som var och en är ungefär hälften av den ursprungliga. Svårigheten med metoden som sådan är att det är viktigt att gruspropppen verkligen stoppar detonationen samtidigt som den måste vara så kort att man inte försämrar styckefallet alltför mycket.

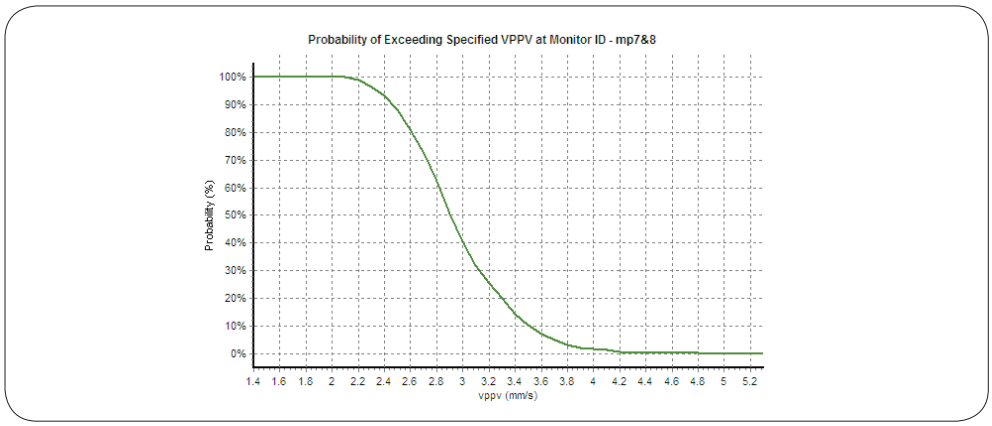
För att framgångsrikt kunna bryta berget med denna metod är det nästan en förutsättning att använda elektroniksprängkapslar. Orsaken till detta är att elektroniksprängkapslar har mycket högre precision än pyrotekniska vilket är viktigt i detta fall.

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

Ett simuleringsexempel på delladdning kan ses i figurerna 31 och 32. Som kan noteras kan man på detta sätt reducera vibrationsnivåerna ganska kraftigt. Resultatet skall jämföras med simuleringen av samma hål fast fulladdade (figur 27) där risken att överstiga 4 mm/s var 70 %, ner till det delladdade hålet i figur 32 där risken att överstiga 4 mm/s reduceras till att vara ca 2 %.



Figur 31. Laddning med delladdning. Borrplanen är identisk med ”brytningsriktning 2” i figur 25 men laddningen är här uppdelad på två laddningar per hål.



Figur 32. Mp 7&8 ca 2% sannolikhet att gå över 4 mm/s, medelvärde 2,9 mm/s. Tidsfördröjningen är 70 ms mellan hål och 35 ms mellan deck.

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

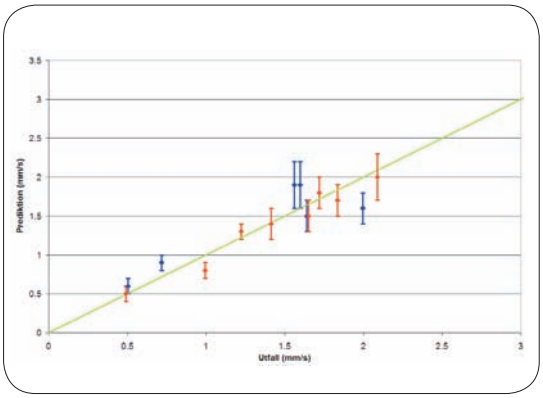
När kalibreringssalvorna i detta projekt sköts var två av kalibreringssalvorna delladdade (kalibreringssalva 4 och 5). Försöken med delladdning var mycket framgångsrika såtillvida att resultatet från sprängningen stämde nästan perfekt med beräkningarna vi båda tillfällena. Vad man kan se av dessa två salvor är hur viktigt det är att hålla isär tiderna för att få någon effekt av delladdningen. I försöken kunde noteras hur den förväntade vibrationsnivån mellan två nästan identiska delladdade salvor var 1,5 mm/s respektive 1,3 mm/s beroende på att tiderna utökades från ca 17 ms per laddning till 35 ms. Detta skall jämföras med den fulladdade salvan där beräknad vibrationsnivå var 1,8 mm/s.

Monte Carlo modellen i jämförelse mot skallagsekvationen

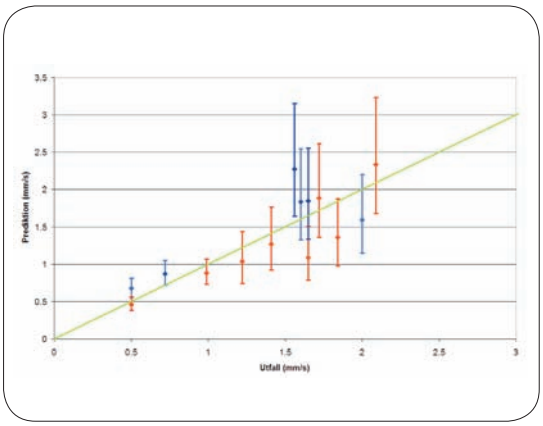
Till sist kan det vara av intresse att undersöka hur Monte Carlo modellen förhåller sig till det mer konventionella sättet att utföra vibrationsprediktion, dvs. enbart genom regressionsanalys och skallagsekvationen. Viktigt att komma ihåg är ju att Monte Carlo modellen delvis är en regressionsanalys modell. Denna har beskrivits tidigare men i ”normala” fall använder man alltså enbart denna parameter i sin prognos.

För att göra en jämförelse kan vi plotta resultatet för regressionsanalysen på samma sätt som vi gjorde med Monte Carlo simuleringen. Vad vi i princip ser här är att båda modellerna verkar fungera bra. Nedan jämförs resultaten, figur 33 och 34.

Vad vi dock kan notera är att den osäkerhet vi beräknar, standardavvikelsen, är betydligt större i regressionsanalys- och skallagsekvationsfallet. Detta beror huvudsakligen på att fler parametrar behandlas i Monte Carlo Modellen.



Figur 33, utfall från Monte Carlo modellen.



Figur 34, utfall från regressionsanalys.

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

Slutsatser

Monte Carlo modellen har visat sig vara ett mycket kraftfullt verktyg när det gäller att prediktera vibrationer från sprängsalvor. Modelleringsverktyget ger på ett mycket övertygande sätt en möjlighet att modellera storleken från vibrationer inte bara med avseende på avstånd och laddning utan även vad gäller tändplan, tändsystem och avskärmning/brytningsriktning.

I jämförelse med konventionell vibrationsprediktion genom regressionsanalys och skallagsekvationen, så ger modellen betydligt mindre standardavvikelse vid beräkning av vibrationer. Modellen ger helt enkelt noggrannare och tillförlitligare vibrationsberäkningar.

Tack till

Anders Jonsson Nordkalk AB som initierade detta projektet, Niclas Nilsson (Forcit Sverige AB) som har fungerat som projektledare för det övergripande projektet. Roger Dahlbeck (Nitro Consult, Göteborg) som var mätansvarig under huvudprovsprängningarna. Tack även till sprängare och laddoperatörer på Nybergs och Orica Mining Services för ett väl genomfört projekt. Värdefulla tips och råd har även kommit från Alex Spathis och Michael Noy, Orica Mining Services, Australien. Carl Lind bör även nämnas för sin insats som granskare.

Referenser

1. Anderson D.A., 2008: Signature Hole Blast Vibration Control – Twenty Years Hence and Beyond. Proc of the annual conf. of explosives and blasting technique. V 34(2), sid 27–38.
2. Blair D.P., 1999: Statistical models for ground vibration and airblast. Fragblast, The International Journal for Blasting and Fragmentation., V 3, sid 335–364.
3. Blair D.P., Armstrong L.W., 2001: The Influence of Burden on Blast Vibration. Fragblast, The International Journal for Blasting and Fragmentation. V 5, sid 108–129.
4. Blair D. P., 2004: Charge Weight Scaling Laws and the Superposition of Blast Vibration Waves, Fragblast, The International Journal for Blasting and Fragmentation. V8, sid 221–239.
5. Blair D.P., 2007: Non-Linear superposition models of blast vibration. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. V 45, sid 235-247.
6. Persson P-A., Holmberg R., Lee J., 1993: Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press.
7. Spathis A.T., 2009: A brief review of the measurement, modelling and management of vibrations produced by blasting Workshop on vibrations from blasting 12-13 September 2009 Granada, SPAIN, sid 1–11.