



# **Sprängskador från strängemulsion, fältförsök och förslag till skadezonstabell som innehåller samtidig upptändning**

## **Blast damage from string emulsion, field tests and a damage zone table including simultaneous initiation**

**Mats Olsson, Swebrec  
Johan Svärd, Orica  
Finn Ouchterlony, Swebrec**



**Swebrec**





# **Sprängskador från strängemulsion, fältförsök och förslag till skadezonstabell som innehåller samtidig upptändning**

## **Blast damage from string emulsion, field tests and a damage zone table including simultaneous initiation**

**Mats Olsson, Swebrec  
Johan Svärd, Orica  
Finn Ouchterlony, Swebrec**

Stockholm October 2008  
Swebrec - Swedish Blasting Research Centre

Luleå University of Technology • Dept of Civil, Mining and Environmental Engineering  
Division of Mining and Geotechnical Engineering



---

## SAMMANFATTNING

Denna rapport redovisar ett antal sprängtekniska försök vars syfte var att bestämma sprickutbredningen för olika laddningskoncentrationer av frikopplad bulkemulsion. Försöken utfördes under 2006 i ett blockstensbrott i Halland. Uppläggningsen av försöken omfattar sprängning av försöksrader, sprängning av tätsöm bakom försöksraden, uttag av block, neddelning av block, sågning av block vinkelrätt försökshålen samt sprickkartering av de sågade ytorna med hjälp av penetranter.

Försöksomgång 1 och 2 inleddes med borrhning och sprängning av ett antal pallar med horisontella hål. Detta för att i största mån efterlikna förhållandena vid kontursprängning av en tunnelsalva. Således valdes en håldimension på 48 mm, en försättning på 0,7 m, ett hålavstånd på 0,6 m och ett håldjup på 5,0 m. Hålen laddades med strängemulsion enligt SSE-konceptet från dåvarande Dyno Nobel. Laddningskoncentrationerna var 0,35 kg/m, 0,5 kg/m samt 0,9 kg/m. Dynotex 1, 17 mm (tidigare Gurit 17), användes som referenssprängämne. Hålen initierades dels med Nonel och dels med elektroniska sprängkapslar. Några av hålen vattenfylldes innan laddning för att undersöka vattnets inverkan på sprickbildning. Tyvärr blev inte resultatet av dessa inledande försök bra. Detta berodde på att berget var betydligt sämre än förväntat med många stora slag. Vidare var det svårt att få rätt längd på bottenladdningen och spridning i intervallerna ledde till ryckare och skador på berget.

Osäkerheten i laddningsmängder och initiering ledde till att försöksomgång 3 genomfördes med 23 st vertikala hål med håldimension, försättning och hålavstånd enligt tidigare försök. För att ladda dessa hål tillverkades hos Orica i Gyttorp rörladdningar med SSE med laddningskoncentrationerna 0,35 kg/m och 0,5 kg/m. Varje laddning vägdes efter tillverkning. Hålen initierades med i-kon<sup>®</sup> elektroniksprängkapslar från Orica. Hälften av hålen initierades simultant, dvs. vid 0 ms, och resterande hälft med en simulerad tändspridning på 1-10 ms.

Resultatet av denna sprängning blev mycket bra, dvs. många kvarstående halvpipor, en relativt jämn bergyta och klart färre problem med blockuttag. Klart bästa resultat erhöles från hålen med simultan initiering. Från hålen med tändspridning hittades en del odetonerade laddningar efter sprängningen. Detta är ett vanligt fenomen vid sprängning med rörladdningar och icke simultan initiering.

Totalt karterades 24 st sågsnitt i detta projekt. Det var här ingen större skillnad på spricklängden mellan de simultant initierade 17 mm Dynotex 1 och SSE 0,35 kg/m, däremot fördubblades spricklängden med SSE 0,5 kg/m. Simultan initiering ger bästa resultat, dvs. jämnare väggar och kortare sprickor. Förekomsten av vatten i hål med SSE 0,5 kg/m uppskattas ge nära 1 m spricklängd. Foliationen har en mycket stor betydelse för spricklängden och spricklängden, men inte nödvändigtvis deras inträngningsdjup, fördubblas vid sprängning snett mot eller parallellt foliationsriktningen.

I grunden har alltså SSE strängladdning visat sig kunna ge sprick- eller skadezoner av samma djup som de klenaste rörladdningar som normalt används vid skonsam kontursprängning. Lägg till att

---

tekniken är rationell och enkel och därför används alltmer, vilket kommer entreprenörer och beställare av tunnelarbeten till godo.

I våra försök användes äldre utrustning vilket gav problem med bottenladdningens längd. Med den modernare utrustning som nu finns är enligt Orica detta problem under kontroll. Effekten av den ojämna laddsträngen vid laddningskoncentrationen 0,5 kg/m märks sannolikt inte vid normalt tunnelarbete eftersom även andra omständigheter varierar betydligt.

Vi såg också att laddsträngen kan skjuvas av vid laddning i vattenfyllda hål, sannolikt därför att den är lättare än vattnet. Om konturhålen är torra eller som brukligt lutas något uppåt borde detta inte inträffa.

Vattenfickor i laddsträngen har sannolikt medverkat till att strängemulsionens detonationshastighet sjunkit från ca 3000 m/s till 2500 m/s på två veckor. Med tiden kan strängen inte detonera. Då en laddad tunnelsalva normalt sprängs inom något dygn är inte heller detta ett problem.

Avskjuvade laddsträngar medför sannolikt detonationsavbrott men pyroteknisk upptändning av rörladdningar vid skonsam kontursprängning under jord orsakar både detonationsavbrott och ryckare som kan ge odetonerade laddningar på berghögen. Bortsett från säkerhetsriskerna med detta bidrar en mindre väl fungerande sprängteknik till onödigt stora nitratutsläpp till omgivningen.

Tidigare skadezonstabeller och data för skonsam sprängning med pyroteknisk (Nonel-) upptändning visar god överensstämmelse. Motsvarande data för simultan upptändning med elektronisprängkapslar ger betydligt grundare skadezon, dvs. kortare spricklängder vid samma laddningskoncentration. Försöksdata för Dynotex 1 och SSE 0,35 och 0,5 kg/m från denna undersökning faller in väl i denna bild.

Simultan upptändning med elektronisprängkapslar ger vid skonsam sprängning med normal laddningskoncentration ( $q < 0,6 \text{ kgDxM/m}$ , dvs. sprängämnets sprängstyrka måste uttryckas i ekvivalent mängd av referenssprängämnet Dynamex M), normal håldiameter (45-64 mm) och normalt hålavstånd ( $S/B < 1$ ) en skadedämpande effekt jämfört med Nonel-upptändning. För större laddningskoncentrationer och kopplingsgrader verkar den simultana upptändningen förstärka sprängskadorna.

Den skadedämpande effekten vid simultan upptändning har utnyttjats för att föreslå en utökad skadezonstabelle enligt följande, se nästa sida. Notera att teoretiskt skadezonsdjup i denna och andra refererade undersökningar motsvarar uppmätta spricklängder.

Not a innebär att utöver kraven på laddningskoncentration ( $q < 0,6 \text{ kgDxM/m}$ ), normal håldiameter (48-54 mm) och normalt hålavstånd ( $S/B < 1$ ) så krävs att upptändningen görs väl inom 1 ms och att hålen är bevisat torra för att den skadedämpande effekten skall uppstå. Detaljerna redovisas i rapporten som också diskuterar effekten av avvikelser från dessa krav.

---

**Förslag till utökad skadezonstabell (figur CBC/1 hänvisar till AnläggningsAMA 98)**

Teoretiskt skadezonsdjup i m enligt figur CBC/1, högst	Laddningskoncentration i kg DxM/m, högst	
	Nonel	simultan <sup>a</sup>
0,2	0,1	0,2
0,3	0,2	0,3
0,5	0,3	0,4
0,7	0,4	0,5
1,1	0,7	0,6
1,3	0,9	(0,7)
1,7	1,3	-
2,0	1,6	-

---

*Not a: Förutsättningarna för användning av dessa värden ges nedan*

Den SSE strängemulsion som använts i våra försök, 0,35 och 0,5 kg/m, motsvarar 0,25 och 0,35 kg DxM/m. Vid Nonelupptändning ger tabellen teoretiska skadezonsdjup om högst 0,5 och 0,7 m. Vid simultan upptändning blir skadezonen mindre till följd av skadedämpningen, högst 0,3 och 0,5 m.

Två olika system med elektronisprängkapslar användes i försöken. I det ena fallet sattes upptändningen till 5000 ms, för vilken tid spridningen angivits till 1 ms. Någon skadedämpande effekt uppstod då sannolikt inte. I det andra fallet sattes upptändningstiden till 0 ms med spridningen 0,05 ms, vilket med största sannolikhet gav den önskade skadedämpningen.

Mycket få resultat erhöles om effekten av vatten i hål. Slutsatsen om att SSE vid 0,5 kg/m i vått hål gett spricklängder på över 1 m jämfört med 10-30 cm för mitthål och högre för kanthål stödjer tidigare observationer om att våta hål vid normal frikoppling kan ge 2-4 ggr djupare skadezon än torra hål.

Vår uppfattning är att rätt användning av elektronisprängkapslar med simultan upptändning minskar risken för ryckare i konturen och att det kan ge en grundare sprängsprickor.

---

## SUMMARY

This report describes tests made to examine the crack pattern from blasting with thin string emulsion charges. The tests were performed in the Bårarp gneiss quarry in south-west Sweden. They include blasting of a number of rows, plus smooth blasting of a row behind to create blocks, and their sawing perpendicular to the test holes, spraying penetrants on the sawed surfaces and crack identification.

To simulate contour blasting in a tunnel, horizontal holes were used in the first test rounds. Holes, 5 m long with 48 mm diameter were drilled with a burden and spacing of 0,7 m and 0,6 m and charged with SSE string emulsion from Dyno Nobel. The nominal charge concentrations used were 0,35 kg/m, 0,5 kg/m and 0,9 kg/m. Dynotex 1, Ø17 mm, a cartridge explosive, was used as a reference. Some of the holes were initiated with Nonel and the others with electronic detonators. Some of the holes were filled with water before charging in order to examine its influence on crack length. Unfortunately the results were poor due to unexpected bad rock conditions, problems with a proper bottom charge concentration and time scatter of the intervals, which gave blowouts and excessive damage to the rock.

In order to avoid these problems the next test was made in another part of the quarry. Vertical holes were then used. They were drilled with the same burden and spacing as the previous tests. However, they had to be charged differently and for this reason cartridge charges were specially made by Orica in Gyttorp. A number of plastic pipes of two different dimension were filled with SSE-emulsion corresponding to 0,35 kg/m and 0,5 kg/m. Every cartridge charge was weighed. The holes were initiated with Orica's i-kon<sup>®</sup> electronic detonators. Half of the number of holes were initiated simultaneously at 0 ms and the other half with a time scatter of 1-10 ms to simulate Nonel initiation.

The results of this blast were good, i.e. many remaining half-casts and a relatively smooth rock surface. The holes with simultaneous detonation gave the best result, from those with a scattered timing a number of undetonated charges were found. This is a common problem when cartridge charges are used in combination with ordinary pyrotechnic detonators and especially for high interval numbers.

Altogether 24 sawed cuts were surveyed. The crack pattern of each area was measured. The crack pattern analysis showed no real difference in crack length between the simultaneously initiated 17 mm Dynotex and SSE 0,35 kg/m charges. As for SSE 0,5 kg/m the crack length increased by 50 %. Simultaneous initiation results in a smoother wall and shorter cracks. Water in holes charged with 0,5 kg/m could result in crack lengths of 1 m. The foliation is very important and the crack length, but not necessarily the depth of the cracked zone, is doubled when blasting parallel to the foliation.

Basically it has thus been shown that SSE string emulsion may give as shallow zones of cracking or blast damage as the smallest pipe charges in normal use in cautious perimeter blasting. The technique is rational and simple and is finding an increased use, which benefits both builders and contractors.



---

We used old equipment in our tests, which gave bottom charges of varying lengths. With the modern equipment now available this is, according to Orica no longer a problem. The uneven emulsion string for the concentration 0,5 kg/m probably gives no noticeable effect in normal tunnelling work as other conditions vary substantially too.

We observed that the emulsion string could be sheared off when charging in water-filled holes, probably because the string was less dense than the water. If the contour holes are dry or as usual angled somewhat upwards, this should not occur in practice.

Water pockets in the string were probably at least partly responsible for the decrease in VOD of the emulsion over two weeks time. With time the string would no longer detonate. As a normal tunnel or drift round is fired within a day or two, this shouldn't be a problem either.

Sheared-off strings carry the risk of detonation failures but pyrotechnic initiation of pipe charges in cautious contour blasting cause both detonation failures and cut-offs that leave undetonated charges in the muck pile. On top of the safety issue, a badly working blasting technique leads to unnecessary nitrate emissions to the surroundings.

A review of earlier damage zone tables and data from cautious contour blasting with pyrotechnic (Nonel) initiated charges shows a good correspondence. Earlier damage zone data for simultaneous initiation gives more shallow damage zones for the same charge concentration. The present data for Dynotex 1 and SSE strings with 0,35 and 0,5 kg/m fall into this pattern.

An instantaneous initiation with electronic delay detonators in cautious blasting has a damage suppressing effect compared to Nonel initiation if the charge concentration is low enough ( $q < 0,6$  kgDxM/m i.e. the strength of the explosive is expressed in equivalents of the reference Dynamex M), the hole diameter is normal (45-64 mm) and the spacing to burden ratio is normal ( $S/B < 1$ ). For larger charge concentrations and coupling ratios the simultaneous initiation appears to amplify the damage.

The damage suppressing effect is used to suggest a revised damage zone table with a new column for simultaneously initiated charges. Note that theoretical damage zone depth corresponds to measured crack lengths in this and other referenced investigations. See table below.

Note a implies shortly that in addition to the requirements on charge concentration ( $q < 0,6$  kgDxM/m), a normal hole diameter (48-54 mm) and a normal spacing ( $S/B < 1$ ), it is required that the initiation scatter lies well below 1 ms and that the bore holes are absolutely dry for the damage suppressing effect to occur. The report discusses the effect of deviations from these requirements.

The SSE string emulsion used in our tests, 0,35 and 0,5 kg/m, corresponds to 0,25 and 0,35 kg DxM/m. For Nonel initiation the table gives theoretical damage zone depths of less than 0,5 and 0,7 m. At simultaneous initiation the damage zone becomes shallower due to the damage suppression effect, less than 0,3 and 0,5 m.

---

**Suggested revised damage zone table (figure CBC/1 refers to AnläggningsAMA 98)**

Theor. damage zone depth in m as in figure CBC/1, maximum	Charge concentration in kg DxM/m, max	
	Nonel initiation	simultaneous <sup>a</sup>
0,2	0,1	0,2
0,3	0,2	0,3
0,5	0,3	0,4
0,7	0,4	0,5
1,1	0,7	0,6
1,3	0,9	(0,7)
1,7	1,3	-
2,0	1,6	-

---

*Note a: The conditions for the use of these data are discussed below*

Two different systems of electronic detonators were used in the tests. In one case the initiation was delayed 5000 ms, with the nominal scatter of 1 ms. There was probably no damage suppression in this case. In the second case, the initiation was simultaneous, at 0 ms, with the nominal scatter 0,05 ms. This has most probably given the desired damage suppression.

The investigation gave meagre results on the effect of water around decoupled charges. The conclusion that SSE at 0,5 kg/m gives crack lengths of over 1 m, as compared to 10-30 cm for centre holes and higher for edge holes in a group of holes, support earlier observations that wet holes, compared with dry holes, may give a damage zone which 2-4 times deeper.

In our opinion a correct use of electronic delay detonators with a simultaneous initiation decreases the risk of cut-offs and makes it possible to obtain a shallower zone of zones of cracking or blast damage.

## INNEHÅLL

1. BAKGRUND.....	1
2. MÅLSÄTTNING.....	2
3. INTRESSEENTER OCH FINANSIERING .....	2
4. GENOMFÖRANDE.....	2
4.1    Försöksomgång 1 (maj 2006) .....	4
4.1.1    Resultat av sprängning; försöksomgång 1 .....	6
4.2    Försöksomgång 2 (juni 2006) .....	8
4.2.1    Resultat sprängning; försöksomgång 2.....	11
4.2.2    Resultat sågning.....	14
4.3    Försöksomgång 3 (november 2006) .....	16
4.3.1    Resultat av sprängningen, försöksomgång 3 .....	19
5. SAMMANFATTNING AV FÄLTFÖRSÖKEN.....	26
6. FÖRSLAG TILL NY SKADEZONSTABELL.....	27
6.1    Mer om tidigare skadezonstabeller .....	28
6.2    Om inverkan av olika faktorer vid simultan upptändning .....	29
6.3    Jämförelse av tidigare data, skadezonstabell och här uppmätta sprickdjup.....	31
6.4    Förslag till ny skadezonstabell.....	33
7. ERKÄNNANDE.....	36
8. REFERENSER .....	36

## BILAGOR

Bilaga 1: Referensgruppen i projektet sprängskador från strängemulsion.....	38
Bilaga 2: Data från salva 1 och 2, försöksomgång 1 (maj 2006) .....	38
Bilaga 3: Placering av mätgivare för vibrationsmätningar, försöksomgång 1 (maj 2006).....	39
Bilaga 4: Vibrationssignaler, försöksomgång 1 (maj 2006).....	40
Bilaga 5: Data från salva A, försöksomgång 2 (juni 2006).....	41
Bilaga 6: Data från salva B, försöksomgång 2 (juni 2006) .....	42
Bilaga 7: Data från salva D, försöksomgång 2 (juni 2006).....	42
Bilaga 8: Provskjutning av rör laddade med SSE, dagen efter laddning 2006-11-09 .....	43
Bilaga 9: Provskjutning av rör laddade med SSE, 1 vecka efter laddning 2006-11-09 .....	43
Bilaga 10: Provskjutning av rör laddade med SSE, 2 veckor efter laddning 2006-11-09.....	43
Bilaga 11: Data från försöksomgång 3 (november 2006), EPD-kapslar i-kon <sup>®</sup> .....	44
Bilaga 12: VOD-mätning, försöksomgång 3, 2006-11-28 .....	45
Bilaga 13: 3D-modell av pallfronten efter skjutning i försöksomgång 3 .....	47
Bilaga 14: Bilder på fler sågade snitt i Bårarpsbrottet .....	48

Bilaga 15: Ett urval av uppmätta spricklängder i (cm).....	51
Bilaga 16: Bakgrundsformler för beräkning av skadezonsdjup .....	53

## FIGURER

Figur 1: Försöksuppställning.....	3
Figur 2: Försöksplats för pall 1-2.....	5
Figur 3: Vattenfyllning.....	5
Figur 4: Laddtrucken.....	5
Figur 5: Laddsträng efter gasning .....	6
Figur 6: Laddsträng i hål .....	6
Figur 7: Sprängresultat pall 1 och 2 .....	6
Figur 8: Resultat från pall 1, EPD .....	6
Figur 9: Utkastade, odetonerade Dynotextrör .....	7
Figur 10: Resultat från pall 2, Nonel.....	7
Figur 11: Försöksplatsen i Bårarpstakten.....	8
Figur 12: Borrugg Tamrock Minimatic.....	8
Figur 13: Elverket om 250 kVA.....	8
Figur 14: Vattentankar och pump.....	8
Figur 15: Laddsträng vid nominellt 0,5 kg/m.....	10
Figur 16: Laddsträng vid nominellt 0,5 kg/m.....	10
Figur 17: Pall med påhugg, försök A, Nonel-upptändning .....	10
Figur 18: Pall med påhugg, försök B, Nonel-upptändning.....	10
Figur 19: Pall med påhugg, försök D, elektronikupptändning (EPD).....	11
Figur 20: Sprängningsresultat, försök A, Nonelupptändning.....	12
Figur 21: Sprängningsresultat, försök B, Nonel.....	12
Figur 22: Sprängningsresultat, försök D, EPD.....	12
Figur 23: Sprängningsresultat, försök D, EPD.....	13
Figur 24: Sprängningsresultat, försök D, EPD.....	13
Figur 25: Hål D1-D2, SSE 0,35 kg/m, EPD.....	14
Figur 26: Hål A2-A3, SSE 0,35 kg/m, Nonel.....	14
Figur 27: Hål A6, SSE 0,5 kg/m, Nonel.....	15
Figur 28: Hål B1-B3, SSE 0,9 kg/m, Nonel.....	15
Figur 29: Hål D5-D6, Dynotex, EPD .....	15
Figur 30: Hål D7, Kemix A, EPD .....	15
Figur 31: Borrning av hålen i etapp 3.....	16
Figur 32: Bottenladdning.....	17
Figur 33: Strängladdning i vattenfyllt rör.....	17

Figur 34: Laddning av emulsionsrör .....	19
Figur 35: Förvägsladdade emulsionsrör .....	19
Figur 36: Borrhålspipor efter hål 1-12 från höger, simultan initiering med EPD .....	20
Figur 37: Pipor efter hål 17-23, simulerad Nonel-upptändning .....	20
Figur 38: Pipor efter hål 13-16, simulerad Nonel-upptändning .....	20
Figur 39: Hål 2-12 från höger till vänster.....	21
Figur 40: Hål 17-23 från höger till vänster.....	22
Figur 41: Hål 12-17 från höger till vänster.....	22
Figur 42: Översikt över hålen med tändspridning, utkastade rör markerade med rött .....	22
Figur 43: Resultat efter sprängning av tätsöm.....	23
Figur 44: Neddelning av block.....	23
Figur 45: Uppmärkta sågsnitt .....	23
Figur 46: Linsågning av block.....	23
Figur 47: Sprickor hål 1-3, Dynotex, simultan initiering .....	24
Figur 48: Sprickor hål 4-6, SSE 0,35 kg/m, simultan initiering.....	24
Figur 49: Sprickor hål 9-12, SSE 0,5 kg/m, simultan initiering.....	24
Figur 50: Sprickor hål 9 sågsnitt 4, SSE 0,5 kg/m, simultan initiering .....	24
Figur 51: SSE 0,9 kg/m, Nonel-initiering .....	25
Figur 52: Sprickor bakom hål 15, SSE 0,35 kg/m, simulerad Nonel-initiering .....	25
Figur 53 : Spricklängd eller skadezon djup som funktion av laddningskoncentration; jämförelse mellan tabellvärden och försöksdata .....	29
Figur 54: Bild från försök med Ø22 mm Guritladdning i Ø24 mm hål i Vånga.....	30
Figur 55: Sprick- eller skadezon djup mot laddningskoncentration; mätvärden, bl.a. SSE strängemulsion, och beräknade värden jämförda med gränskurvor i skadezonstabell.....	33

## TABELLER

Tabell 1: Försöksmatris (skuggat = vattenfyllda hål; övriga hål är torra).....	3
Tabell 2: Planerade delförsök 1-5 (skuggat = vattenfyllda hål) .....	9
Tabell 3: Utförda delförsök A, B och D (skuggat = vattenfyllda hål).....	9
Tabell 4: Försöksplan för etapp 3.....	18
Tabell 5: Nettovikt emulsion i de laddade rören .....	18
Tabell 6: Upptändningstider för hål 13-23 .....	19
Tabell 7: Sammanställning av spricklängder från utförda försök .....	26
Tabell 8: Sprängämnesklasser och exempel på sprängämne.....	31
Tabell 9: Beräknat ungefärligt sprick- eller skadezon djup $R_c$ för simultan upptändning .....	32
Tabell 10: Spricklängds- eller skadezon data för simultan skjutning snett foliationen .....	33
Tabell 11: Förslag till utökad skadezonstabell .....	34



## 1. BAKGRUND

Vid underjordsentreprenader föreskrivs krav på konturen i form av tillåten skadezon i form av sprickbildning. Dessa krav kan variera mellan olika entreprenader och mellan olika håltyper i en salva. För rörladdningar finns ofta tabeller att tillgå, men de tabeller som i dag används för bedömning av skadezonen är ofullständiga och i grunden endast verifierade för Gurit och Prillit i 45 mm hål. Tabellerna saknar en exakt definition av skada. De säger vidare inget om vare sig hålsättning eller tändspridning. Tabellerna har trots dessa begränsningar varit ett praktiskt verktyg för design av skonsam sprängning.

Laddning med emulsionssprängämne i tunnlar blir allt vanligare. Fördelarna med en emulsion är bl.a. att samma sprängämne kan användas för samtliga hål i salvan, att laddningsarbetet blir effektivare, att emulsionen inte känsliggörs förrän den laddas i hålet, att utvecklingen av toxiska gaser blir gynnsammare än för andra sprängämnen, etc. Vid laddning med emulsionstruck kan sprängämneskoncentrationen dessutom ändras efter önskemål genom att anpassa dimensionen på laddningarna, frikopplad s.k. strängemulsion.

Dock saknas information om hur olika laddningskoncentrationer påverkar berget. Innan man gav tillstånd att använda SSE-emulsion i Södra Länken gjordes försök med en sträng på 0,35 kg/m, vilken visade sig uppfylla kravet på 0,3 m skadezon (Olsson 1999). Detta är emellertid den enda information om hur stor skada strängemulsion ger som idag finns tillgänglig. Därför fanns starka önskemål från såväl användare som beställare och tillverkare att skaffa sig mer kunskap om sprickutbredning från olika dimensioner av strängemulsion.

SveBeFo har tidigare gjort omfattande försök av sprickutbredning för olika sprängämnen under olika förhållanden. Generellt gäller att sprickutbredningen i det kvarstående berget främst påverkas av sprängämnestyp, initiering, vatten i hål, hålavstånd och kopplingsgrad (laddningsdiameter/håldiameter). För att reducera sprickutbredning rekommenderas därför att:

- använda frikopplade laddningar
- tillse att hålen är torra
- använda simultan initiering av hålen
- inte använda för stora hålavstånd

Underlaget till dessa slutsatser kommer från ett stort antal försök i såväl pall- som tunnelsprängning och främst från olika typer av rörladdningar (Olsson & Bergqvist 1995, 1997; Olsson 2000).

Ökad infrastrukturell utbyggnad innebär ofta bergarbeten i tätort med stora krav på begränsade skador på omgivningen. Det är därför nödvändigt med en uppdaterad tabell för bestämning av skador från sprängning som ersätter dem som nu används, särskilt nu när kraven på rätt utfört arbete ökar. SveBeFo/Swebrec har arbetat med dessa frågeställningar och tagit fram ett grundförslag till ny formel för

sprick- eller skadezonen (Ouchterlony & Olsson 2000, Olsson & Ouchterlony 2003). Några viktiga faktorer som behöver belysas mer är inverkan av strängladdning och vattenfyllda hål.

Därför initierades 2006 projektet ”Skonsam sprängning och nya skadezonsformler”. Målet var främst att undersöka sprickbilden vid sprängning med strängemulsion samt inverkan av vatten. Dessutom skulle riktlinjer tas fram för en ny skadezonstabell. Underlaget består alltså av spricklängdsmätningar varför begreppet skadezon djup innebär någon form av bedömning av att dessa sprickor är skadliga för konstruktionen. Detta bör strängt taget beställaren och konstruktören ta ställning till i det enskilda fallet. För att det varit brukligt används ändå termen skadezon här, men i betydelsen sprickzon.

## **2. MÅLSÄTTNING**

Målsättningen med projektet var att bestämma sprickutbredningen från ytterligare två laddningskoncentrationer med bulkemulsion i form av strängladdning utöver grundkoncentrationen 0,35 kg/m. Dessutom skulle riktlinjer tas fram för inverkan av såväl vatten i hålen som tändspridning. Vid projektets slut skulle en ny mer användaranpassad skadezonstabell finnas.

## **3. INTRESSENTER OCH FINANSIERING**

Intressenter i projektet var Orica, SBUF (genom Skanska), Banverket, SKB samt Swebrec. Projektet kostnadsberäknades till 1060 tkr men under senare delen av projektet utökades budgeten med ett extra tillskott om 200 tkr vilket innebar en total projektbudget om 1260 tkr. Referensgruppens sammansättning, se Bilaga 1.

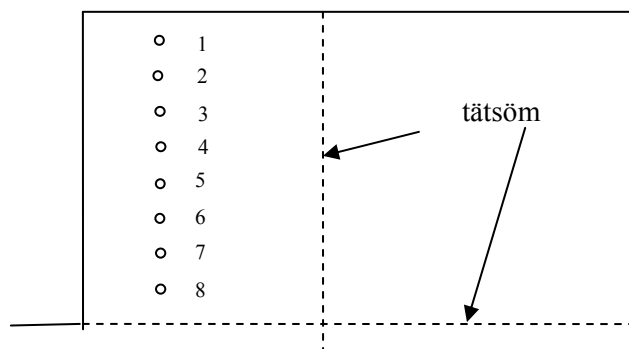
## **4. GENOMFÖRANDE**

Projektet hade två delar, en fältförsöks- och en analysdel med syftet att ta fram nya skadezonsformler. Fältförsöksdelen omfattar sprängning av ett antal försökssalvor i Bårarps blockstensbrott. Det ägs av Emmaboda Granit och är det största blockstensbrottet i Sverige. Brottet ligger högt beläget på ett berg och består av ett flertal stenbrott. Geologin består till största del av grå-röd alkalignejs med en kornstorlek mellan 0,5 och 5 mm (Ronge 2000). Berget är metamorft vilket lett till partiell uppspaltning på vissa platser och en mer phaneritisk struktur. De dominerande mineralen är kvarts, kalifältspat, plagioklas, biotit och muskovit. Mineralkornen har växt samman i den riktning där det minsta trycket rådde och har lagt sig parallellt med detta. Variationer i tryck och temperatur har gett berget en folierad struktur. Foliationens strykning är nord-nordöst och stupningen sydostlig. Berget är sprött och sprickfrekvensen mycket låg. De få sprickor som finns är dock väldigt dominerande och öppna. De mindre sprickorna är oftast slutna och läkta. Se även information från Emmaboda Granit på [www.emmabodagranit.se/](http://www.emmabodagranit.se/) under rubriken Bårarp.



Försöken skulle utföras genom att ett antal horisontella hål borrar i en pallkant. Upplägget liknar det i tidigare försök med test av strängemulsion (Olsson 1998). För att likna vanliga förhållanden i en tunnel valdes en håldimension på 48 mm, en försättning på 0,7 m, ett hålavstånd på 0,6 m samt ett håldjup på 5 m. Laddningskoncentrationerna för strängemulsionen valdes till 0,35 kg/m, 0,5 kg/m och 0,9 kg/m (ett fulladdat hål med emulsion ger en laddningskoncentration på ca 1,5 kg/m motsvarande en densitet om 850 kg/m<sup>3</sup>). Laddning skulle utföras med SSE-truck. Försöken skulle bestå av 5 försöksalvor med vardera 8-10 hål, beroende på pallhöjd. Se Figur 1.

Salvorna skulle initieras dels med elektroniska sprängkapslar (EPD) och dels med Nonel. För en säker upptändning skulle en primer, NobelPrime 15×150 mm, användas. I övrigt skulle hålen fyllas med bulkemulsion pumpad från en laddtruck. Laddningskoncentrationen skulle kontrolleras genom laddning i plexiglasrör. Detonationshastigheten skulle mätas och salvorna videofilmas. Nitro Consult skulle ansvara för vibrationsmätningar för kontroll av intervalltider.



Figur 1: Försöksuppställning

Försöksmetodiken omfattade sprängning av försökspallar, borrning och sprängning av tätsöm bakom försöksrad, uttag av block, neddelning, sågning och sprickkartering enligt tidigare använd metod.

Tabell 1: Försöksmatris (skuggat = vattenfyllda hål; övriga hål är torra)

Hål	Försök 1 / EPD	Försök 2 / Nonel	Försök 3	Försök 4	Försök 5
1	Dynotex 1 (17)	SSE 0,3	SSE 0,5 EPD	SSE 0,9 EPD	DxM 25 EPD
2	Dynotex 1 (17)	SSE 0,35	SSE 0,5 EPD	SSE 0,9 EPD	DxM 25 EPD
3	Dynotex 1 (17)	SSE 0,35	SSE 0,5 EPD	SSE 0,9 EPD	DxM 25 EPD
4	Dynotex 1 (17)	SSE 0,35	SSE 0,5 EPD	SSE 0,9 EPD	DxM 25 EPD
5	SSE 0,35	SSE 0,35	SSE 0,5 Nonel	SSE 0,9 Nonel	DxM 25 Nonel
6	SSE 0,35	SSE 0,35	SSE 0,5 Nonel	SSE 0,9 Nonel	DxM 25 Nonel
7	SSE 0,35	SSE 0,35	SSE 0,5 Nonel	SSE 0,9 Nonel	DxM 25 Nonel
8	SSE 0,35	SSE 0,35	SSE 0,5 Nonel	SSE 0,9 Nonel	DxM 25 Nonel

Fältförsöken skulle genomföras i olika steg och för att vinna tid skulle helst dubbelpallar sprängas. En första försökmatris visas i Tabell 1 ovan. I Försök 1 skulle undersökas sprickutbredning i torra hål för

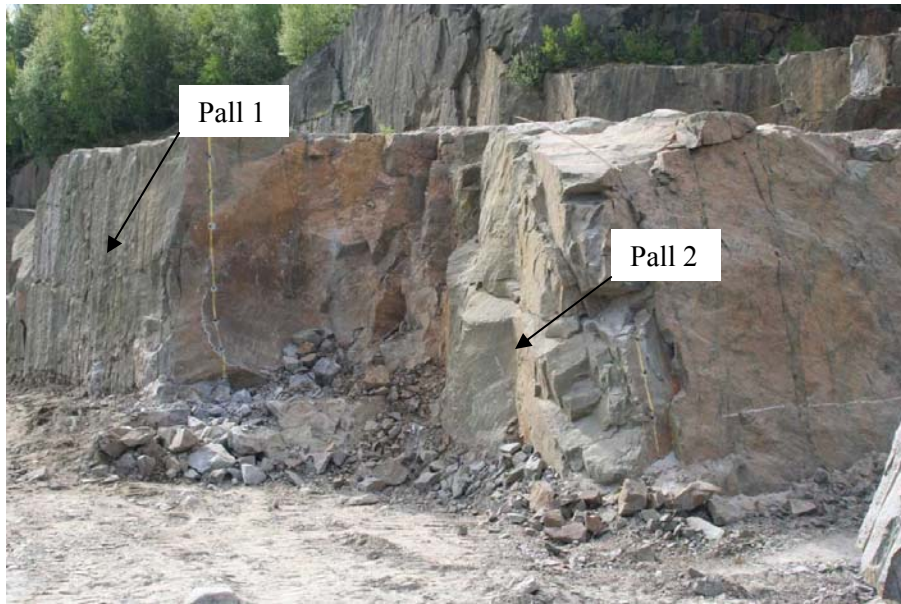
referenssprängämnet Ø17 mm Dynotex 1 (tidigare Gurit) samt för strängemulsion med laddningskoncentrationen 0,35 kg/m. I Försök 2 skulle vattnets inverkan undersökas på hål laddade med strängemulsion 0,35 kg/m och initierade med Nonel. Detta är ett vanligt laddningsförfarande för konturhål i tunneldrivning, kanske också något av ”worst case” då hålen inte initieras simultant och dessutom kan vara vattenfyllda. Sprängämnen, tändare och laddbil skulle tillhandahållas av Orica Mining Services.

Det verkliga genomförandet av projektet kom dock att få en annan uppläggning beroende på problem med bergkvalitet och laddning. Av planerade 5 delförsök genomfördes 6 fältförsök och uppborrades ytterligare 1 omgång. De olika försöken genomfördes i maj 2006, juni 2006, samt i nov 2006.

#### 4.1 Försöksomgång 1 (maj 2006)

Detta försök utfördes i maj 2006. Försöksplatsen låg i samma område där SveBeFo tidigare gjort fragmenteringsförsök (Olsson m.fl. 2003). Pallhöjden var här ca 5 m och bestod av två parallella intilliggande pallar. För borring av de horisontella hålen användes en Tamrock Scout 500. En hylla av berg byggdes vid foten av pallfronten för att borrarregaget skulle kunna nå upp att borra de övre hålen i raden. Hålen i pall 2 borrades med ca 1 grad nedåt lutning för att underlätta efterföljande vattenfyllning. Innan borring renblåstes pallens ovanyta. Pall 1 hade en jämn och slätsprängd front och berget såg bra ut medan berget i pall 2 var i sämre skick med många sprickor, se Figur 2. Vår bedömning och förhoppning var dock att sprängningen med vår täta hålsättning skulle ge ett bra resultat. Hållängder, försättningar och hålavstånd mättes. I pall 1 borrades 8 hål medan det endast fanns plats för 7 hål i pall 2. För att kunna fylla vatten i hålen placerades en vattentank på pallens ovanyta och vattnet fick sedan med självtryck fylla hålen. I hålmynningen placerades en gummipropp med luftningshål. Figur 3 visar utrustningen för vattenfyllning.

Hål 1-4 i salva 1 laddades enligt Tabell 1 med 17 mm Dynotex och resten av hålen i salva 1 samt salva 2 laddades med strängemulsion 0,35 kg/m. Hållängder, laddning m.m. visas i Bilaga 2. För laddning användes en SSE-truck från Orica (då Dyno Nobel), se Figur 4. Salva 1 initierades simultant med HotShot, elektroniska sprängkapslar från DetNet. HotShot-kapslarna har en programmerbar fördröjning från 0 till 20000 ms i steg om 1 ms och en maximal spridning om  $\pm 0,02\%$ . Alla hålen där programmerades att detonera efter 5000 ms vilket motsvarar en normal fördröjning för hålen i en tunnelkontur. Salva 2 initierades med Nonel LP nr 55 och salvorna kopplades ihop med en delningsenhet så att de kunde avfyras på samma gång. Salva 2 skulle starta 25 ms efter salva 1.



**Figur 2: Försöksplats för pall 1-2**



**Figur 3: Vattenfyllning**



**Figur 4: Laddtrucken**

Innan laddning påbörjades kontrollerades laddsträngen genom laddning i hopsatta 2 m sektioner av plexiglasrör. Strängen blev jämn och fin, se Figur 5 och Figur 6. Mittsektionen vägdes för kontroll av laddningsvikt. Laddningsvikten blev 0,35 kg/m vilket var precis vad som önskades. Densiteten kontrollerades och blev  $0,9 \text{ kg/dm}^3$ , se mer data i Bilaga 2. Hål 8 i pall 1 instrumenterades för VOD-mätning.



**Figur 5: Laddsträng efter gasning**



**Figur 6: Laddsträng i hål**

De tre nedre hålen i pall 2 fylldes med vatten och laddades därefter med SSE varvid en del av vattnet pressas ut. Hålen var borrade med lite nedåtlutning för att vattnet skulle stanna kvar. Gummiproppen med vattenslang sattes i hålen igen efter laddning för att se till att hålen var vattenfyllda.

Nitro Consult monterade geofoner och accelerometrar dels på pallens ovanyta men även på en sidovägg, se Bilaga 3. Salvorna videofilmades.

#### **4.1.1 Resultat av sprängning; försöksomgång 1**

Resultatet blev inte bra, se Figur 7. I pall 1 fanns det fem st. synliga halvpipor samt delar av en sjätte halvpipa, se Figur 8. Hål 8 hade inte orkat slå ut och det översta hålet, hål 1, hade helt sprängts bort. Tyvärr fanns det ett slag nära bakom de kvarstående hålpiporna vilket gjorde att det inte bedömdes värt mödan att ta ut block från detta område. Sprickorna från hålen har troligen stannat vid detta slag. Dessutom hittades en större mängd utkastade Dynotex-laddningar, se Figur 9. Eftersom vi märkt laddningarna kunde vi spåra fyra rör från hål 1 (de yttersta laddningarna) samt två rör från hål 4. Dessutom hittades ytterligare sex rör. Resultatet med utkastade laddningar var förvånande. Tidigare erfarenhet i bl.a. Vånga har tydligt visat att hål som detoneras simultant inte resulterar i utkastade laddningar. Däremot är detta vanligt förekommande vid icke simultan initiering.



**Figur 7: Sprängresultat pall 1 och 2**



**Figur 8: Resultat från pall 1, EPD**





**Figur 9: Utkastade, odetonerade Dynotextrör**



**Figur 10: Resultat från pall 2, Nonel**

Sprängningen i pall 2 blev mycket dålig med stor bakåtbrytning och en stor del kvarstående berg, se Figur 10. Endast de tre översta hålen hade detonerat. I hål 4 hade primern inte detonerat och i hål 5-7 detonerade troligen endast primern. Dessa hål var fyllda med vatten vid laddningen. Kontrollen vid laddning visade att densiteten för sprängämnet låg på ca  $0,9 \text{ kg/dm}^3$  och detta har troligen inneburit att laddsträngen flutit upp och därmed har man fått detonationsavbrott.

Berget i pall 2 var mycket mer söndersprucket än vad som hade förväntats. Detta har naturligtvis också starkt bidragit till resultatet. Från denna salva blev det också ett stensprut vilket aldrig förekommit vid tidigare försök. Videofilmen visade att det tog 4,97 sek från första salvan innan kopplingsblocket till andra salvan detonerar. Salva 2 detonerar efter ytterligare 5,68 sek (Nonel LP 55 = 5,5 sek.). VOD-signalen gick tyvärr inte att utvärdera men visade att detonationen slutat. Vibrationsmätningarna gav bäst resultat från accelerometrarna. Från salva 1 framgick det att EPD-kapslarna inte detonerat simultant (flera amplitudtoppar) och från salva 2 fanns det två knippen av signalpaket där den senare troligen är en reflexion från någon närliggande bergyta. I det 1:a signalpaketet kan man urskilja två toppar, se Bilaga 4, vilket betyder att två Nonelkapslar detonerat med en tidsskillnad på ca 10 ms. Detta visar att tändspridningen i höga Nonelnummer verkligen är betydande.

Sammanfattningsvis blev det alltså i försöksomgång 1 problem med såväl berg som laddning i vattenfyllda hål och med initieringen och därför kunde ingen sprickdjupsmätning göras. Bergets inverkan bedömdes vara viktigast orsaken till våra problem. I motsats till runt en tunnel finns det i en öppen pall ingen valvbildning som kan hindra berget framför ett öppet svaghetsplan att rasa ner. Vi bedömde också att rinnande vatten i borrhål kunde ha bidragit till avbrotten i emulsionsträngen.

## 4.2 Försöksomgång 2 (juni 2006)

Efter det mindre lyckade första försöket fick vi tillgång till en annan del av stenbrottet i Bårarp som såg bättre ut. Där pågick ingen produktion. Många av pallarna här hade tidigare tagits ut med linsågning och därför fanns det här många helt släta fronttytor att borra och spränga i.

Tyvärr fick nu Emmaboda ont om borresurser. En kontakt med Atlas Copco gav tips om en borrhög hos Skanska i Hallandsås. Riggen var en tunnelrigg av typ Tamrock Minimatic med två bommar. Riggen fick först justeras från 1000 V till 400 V eftersom elverken ger denna spänning. Således inhyrdes ett stort elverk, ett Atlas Copco QAS 278 på 250 kVA. Riggen krävde också vatten så en lämplig pump hyrdes också. Från Skanska i Hallandsås fick vi också låna två borrhare till riggen. Elverket fick bäras ner i brottet med en hjullastare. Hjullastaren fick också köra ner vatten i två 1000 l tankar. I Figur 11 - Figur 14 visas några bilder från försöksplatsen och utrustningen.



Figur 11: Försöksplatsen i Bårarpstäkten



Figur 12: Borrhög Tamrock Minimatic



Figur 13: Elverket om 250 kVA



Figur 14: Vattentankar och pump

Vid starten av försöksomgång 2 hade den ursprungliga försöksplanen i Tabell 1 modifierats. Fem delförsök planerades, se Tabell 2. Väl på plats så uppborrades 4 salvor, salva A, B, C och D och tre av dem användes. Tabell 3 visar försöksuppläggningsen hos dessa salvor, A, B och D.

**Tabell 2: Planerade delförsök 1-5 (skuggat = vattenfyllda hål)**

Hål	Försök 1 / EPD	Försök 2 / EPD	Försök 3 / Nonel	Försök 4 / Nonel	Försök 5
1	Dynotex 1 (17)	SSE 0,5	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5
2	Dynotex 1 (17)	SSE 0,5	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5
3	Dynotex 1 (17)	SSE 0,5	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5
4	Dynotex 1 (17)	SSE 0,5	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5
5	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5	Kemix A (17)	Kemix A (17)
6	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5	Kemix A (17)	Kemix A (17)
7	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5	Kemix A (17)	Kemix A (17)
8	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,5	Kemix A (17)	Kemix A (17)

**Tabell 3: Utförda delförsök A, B och D (skuggat = vattenfyllda hål)**

Hål	Försök A / Nonel	Försök B / Nonel	Försök D / EPD
1	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,35
2	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,35
3	SSE 0,35	SSE 0,9	SSE 0,35
4	SSE 0,35	SSE 0,9	Dynotex 1 (17)
5	SSE 0,5	Kemix A (17)	Dynotex 1 (17)
6	SSE 0,5	Kemix A (17)	Dynotex 1 (17)
7	SSE 0,5	Kemix A (17)	Kemix A (17)
8	SSE 0,5	Kemix A (17)	Kemix A (17)
9			Kemix A (17)

Försök A:

Pallen var ca 5 m hög och hade en sågad frontyta där sprickorna tydligt framträder. Det fanns, vilket tydligt framgår av fotot i Figur 17, tre huvudsprickor, en nära nog horisontell samt två vertikala sprickor. Dessutom fanns en vertikal spricka som tvärade de förra sprickorna.

Påhuggsläget för borrhålen sattes ut från stege och därefter riktades bommen in. Riktningssinstrumenten på riggen var slitna men vid koll med vattenpass så stämde riktningarna hyfsat bra. Samtliga åtta hål, förutom hål 7, hade en variation i försättning från 0,69 till 0,76 m. Planerad försättning var 0,7 m. Dvs. avvikelserna var max 0,06 m från planerat. För hålavstånden var variationen något större, från 0,57 m till 0,72 m, dvs. avvikelserna max 0,12 m från planerat hålavstånd 0,6 m.

Hål 1-4 laddades med SSE 0,35 kg/m och hål 5-8 med SSE 0,5 kg/m. Samtliga hål initierades med Nonel LP nr 55. En kontrollvägning av SSE-laddsträngen för önskat 0,5 kg/m gav resultatet 0,505 kg/m. Laddningssträngen för 0,35 kg/m var som tidigare visats mycket jämn och fin. Emellertid såg den inte lika bra ut för 0,5 kg/m resp. 0,9 kg/m. Strängen låg här skruvad i plexiglasröret, ibland utdragen ibland hoptryckt, vilket innebär en ojämn laddningskoncentration, se Figur 15 - 16 samt Bilaga 5. Figur 17 visar pallfronten i försök A.





Figur 15: Laddsträng vid nominellt 0,5 kg/m



Figur 16: Laddsträng vid nominellt 0,5 kg/m

### Försök B:

Pallen var också ca 5 m hög och fronten bestod av ett rostfärgat naturligt slag, se Figur 18. Här fanns färre synliga sprickor än i pall A. En tydlig horisontell spricka tvärrar dock hål 7. Hålen hade en variation i försättning från 0,66 m till 0,79 m, dvs. max 0,09 m avvikelse från planerat värde. Hålavstånden varierade från 0,56 m till 0,64 m, dvs. max 0,04 m avvikelse, vilket är mycket bra för vår utrustning.

Hål 1-4 laddades med SEE 0,9 kg/m och hål 5-8 med Ø17 mm patronerad emulsion; Kemix A. Detta i syfte att jämföra resultatet dels med strängemulsion och dels med 17 mm Dynotex. Samtliga hål initierades med Nonel LP nr 55. En kontrollvägning av SSE-laddsträngen gav 1,07 kg/m mot planerade 0,9 kg/m. Mer data från försöket finns i Bilaga 6.



Figur 17: Pall med påhugg, försök A, Nonel-upptändning



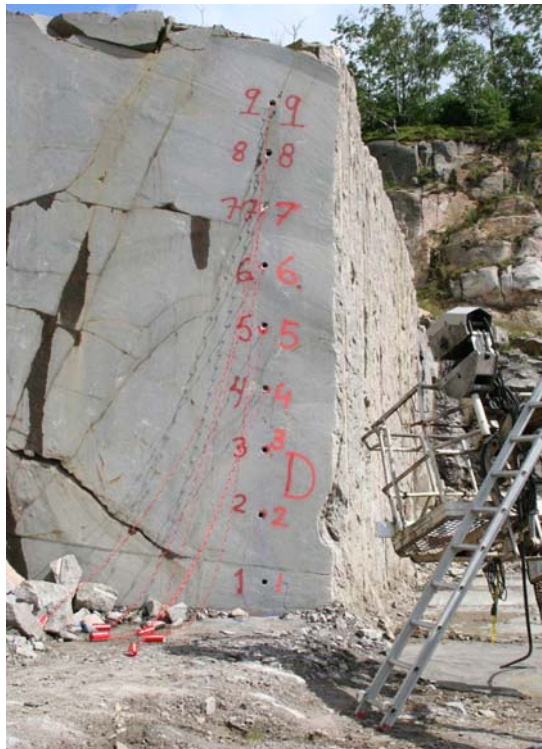
Figur 18: Pall med påhugg, försök B, Nonel-upptändning



Försök D:

Pallen var något högre än pall A och B och var ca 6 m. Påhuggsytan var sågad och här framträdde spricksystemet mycket tydligt, de flesta sprickorna låg dock bakom försökshålen, se Figur 19. Försättningen för hålen varierade från 0,6 m till 0,8 m och hålavståndet varierade från 0,6 m till 0,72 m.

Hål 1-3 laddades med SSE 0,35 kg/m, hål 4-6 laddades med 17 mm Dynotex och hål 7-9 med 17 mm Kemix. Samtliga hål initierades simultant med HotShot elektroniska sprängkapslar programmerade för 5000 ms. Mer data från salva D, se Bilaga 7. Nitro Consult monterade accelerometrar på pallarna för bestämning av intervalltider. Samtliga salvor videofilmades.



Figur 19: Pall med påhugg, försök D, elektronikutpändning (EPD)

#### 4.2.1 Resultat sprängning; försöksomgång 2

##### Pall A:

Resultaten från pall A såg inte bra ut. Det blev gott om stora block och det fanns nästan inga kvarstående borrhålspipor, se Figur 20. Sönderbrytningen verkar ha följt ett slag ty det kvarstående berget var brunfärgat. Från videon kunde man se att initieringen är mycket spridd ty först går hål 3 och hål 4 därefter går ett bottenhål och slutligen kan man senare ana att hål 6 och 7 detonerar. De första hålen som detonerar har troligen orsakat rivning.

Tyvärr fick vi inga resultat från accelerationsmätningarna och inte heller någon VOD-signal. Vi hittade mycket emulsionspill runt sprängda borrhål och det tyder på att emulsionen inte detonerat som den skulle utan gett upphov till detonationsavbrott. I de lössprängda blocken fanns emellertid borrhålspipor kvar som kunde sågas. Totalt kunde vi ta ut 2 block för sågning.

**Pall B:**

Resultat från Pall B blev inte heller bra. Förvisso fanns det några kvarstående borrhålspipor men resultatet visade en stor sönderbrytning från de övre hålen som laddats med SSE 0,9 kg/m. Tändspridningen har sedan gett ryckare och kvarstående laddningar från hål laddade med Kemix, se Figur 21 och Figur 22. Dessutom har det legat ett slag bakom de Kemix-laddade hålen vilket gjorde det omöjligt att få ut block bakom dem.

Det fanns även gott om emulsionsrester på lössprängda block, se t.ex. blocket i förgrunden i Figur 21 vilket tyder på odetonerade laddningar. Endast ett block kunde tas ut för sågning.



**Figur 20: Sprängningsresultat, försök A, Nonelupptändning**



**Figur 21: Sprängningsresultat, försök B, Nonel**



**Figur 22: Sprängningsresultat, försök D, EPD**



Vibrationsanalys utfördes av Nitro Consult. Hålen initierades med kapslar typ Nonel LP nr 55 och skulle detonera vid 5500 ms eller 5,5 s med en nominell spridning om 0,15 s. En jämförelse av vibrationsmätningarna med videofilmen visade att de detonerade vid 5,05 s, 5,10 s, 5,15 s, 5,50 s, 5,80 s, 5,90 s, 6,40 samt 6,50 s, dvs. med betydligt större spridning än förväntat. Vi fick inte heller denna gång någon VOD-signal.

#### Pall D:

Resultaten blev bättre med flera synliga borrhålspipor, se Figur 23 - Figur 24. Dock fanns ett odetonerat hål kvar, nr 4, med Dynotex samt flera utkastade Kemix-laddningar. Detta tyder på hålen inte detonera samtidigt. Nitro Consults mätningar var svårtolkade men pekar i samma riktning och man anger en spridning på 6-7 ms. Det fanns troligen en betydande tändspridning hos dessa elektronik-kapslar. För HotShot anges en tändspridning på 0,02% av vald fördröjningstid (Detnet), vilket nominellt 5000 ms ger tändspridningen 1 ms, (sen tidigare vet vi att tändspridningen måste vara < 1 ms för simultan effekt). Hål nr 3 som laddades med SSE 0,35 kg/m har slagit upp ett mussligt brott vid hålbotten. Sannolikt har bottenladdningen varit för stark och skadat hål 4 som måste ha detonerat efteråt. Det framgår också tydligt att berget här hade många naturliga sprickplan och att man därför fått en kraftig sönderbryning uppåt. Från denna pall kunde tre block tas ut för senare sågning.



Figur 23: Sprängningsresultat, försök D, EPD



Figur 24: Sprängningsresultat, försök D, EPD

#### 4.2.2 Resultat sågning

För de tre pallarna blev det bara sex bra stenblock som kunde tas till sågning. Blocken sågades med linsåg i Bårarp. Efter rengöring och torkning av sågytorna sprayades en penetrant på sågytorna. Överflödigt penetrant spolades bort, sågytorna torkades igen varvid de sprickor som finns nu framträder mycket tydligt.

Simultan initiering med elektroniska sprängkapslar (EPD) brukar alltid ge kortast spricklängd. Här var dock inte resultatet så lättolkat och för hål med SSE 0,35 kg/m initierade med EPD-kapslar blev det mycket långa sprickor, medan samma sprängämne initierat med Nonel inte gav någon synbar sprickbildning. Det fanns extremt mycket sprickor i blocket där hål med SSE 0,35 kg/m initierats med EPD, se Figur 25. Det är också konstigt då detta block har suttit närmast påhugget och laddningskoncentrationen borde där ha varit låg. Resultaten styrker den tidigare slutsatsen att hålen inte detonerat simultant. Medelvärdet av den maximala spricklängden blev 55 cm alltså betydligt längre sprickor än tidigare kartering vid en tunnelsalva i Södra Länken (Olsson 1998) där spricklängden blev ca 20 cm med simultan initiering och ca 30 cm vid initiering med Nonel.



Figur 25: Hål D1-D2, SSE 0,35 kg/m, EPD



Figur 26: Hål A2-A3, SSE 0,35 kg/m, Nonel

En orsak till de långa sprickorna kan ha varit att bottenladdningen blev för stor ty under laddningsarbetet kom inställningarna att ändras ett par gånger. En annan orsak är troligen tändspridningen. Initiering av SSE 0,35 kg/m med Nonel gav inga sprickor alls vilket måste bero på att hålen inte har detonerat, se Figur 26. Här har tändspridningen varit så stor att man fått ryckare.

För hålen som laddades med SSE 0,5 kg/m respektive 0,9 kg/m och initierats med Nonel blev medelvärdet av den maximala spricklängden 36 cm respektive 60 cm, se Figur 27 - Figur 28. Sprickbilden från SSE 0,9 kg/m är rätt komplicerad och vittnar om stor laddningsmängd.

Vid laddningskoncentrationer större än 0,35 kg/m är den verkliga laddningsmängden osäker även om den i snitt håller rätt koncentration så vet vi inte vad den varit i våra sågsnitt. Därför skall man vara lite försiktig vid tolkningen av dessa resultat.





Figur 27: Hål A6, SSE 0,5 kg/m, Nonel



Figur 28: Hål B1-B3, SSE 0,9 kg/m, Nonel

Spricklängden hos 17 mm Dynotex och 17 mm Kemix, båda simultant initierade, visas i Figur 29- Figur 30. Dynotex gav en maximal spricklängd på drygt 30 cm och Kemix ca 15 cm. Mellan hål D5 och D6 (Dynotex) syns sprickor som verkar ha samverkat. Från hål D7 (Kemix) fanns endast en kort spricka som eventuellt sökt sig mot den strukturella sprickan bakom. Spricklängden för Kemix kan verka trolig medan Dynotex fått betydligt längre sprickor än normalt. Åter igen beror detta troligen på att hålen inte detonerat simultant. Spricklängderna påminner mest om hål i Vånga-försöken som initieras med Nonel.



Figur 29: Hål D5-D6, Dynotex, EPD



Figur 30: Hål D7, Kemix A, EPD

De stora svårigheterna med berget, laddningsarbetet och upptändningen under försöksomgång 1-2 ledde bara till ett fåtal sågbara block. Initieringsproblemen ledde till att den förväntade effekten av simultan upptändning uteblev. Ryckare förstörde närliggande hål ur vilka även odetonerade laddningar kastats ut. Brytningen i botten av vissa hål ledde till misstanken att den minimala bottenladdning med strängemulsion som vi eftersträvat, ca 0,2 m, inte kunnat hållas så låg.

Detta ledde till en omvärdering av försöksförutsättningarna som hittills varit att så mycket som möjligt efterlikna konturraden i en tunnelsalva. Dessa övergavs i syfte att få fram resultat om effekten av högre laddningskoncentrationer med strängemulsion, 0,5 och 0,9 kg/m, och av vatten i hålen. Vi beslöt använda:

- Vertikala hål, vilka är lättare att borra och ger ett bergutfall som är mindre känsligt för att befintliga svaghetsplan
- Kontrollerade laddningsvikter genom att ladda strängemulsionen i prefabricerade plaströr
- Elektronikapslar med högre precision i upptändningen, Orica i-kon<sup>®</sup>
- Ett område i brottet med bättre bergförhållanden

### 4.3 Försöksomgång 3 (november 2006)

Denna etapp utfördes i samma brott som vid försöksomgång 2 men i en del med betydligt bättre berg, se Figur 31. Borrningsresurs togs åter igen från Skanska. Således borrades en pall bestående av 24 st. Ø 48 mm vertikala hål som var ca 4 m djupa. Den planerade försättningen var 0,7 m och hålavståndet 0,6 m.



Figur 31: Borrning av hålen i etapp 3

För att i möjligaste mån fortfarande kunna använda SSE-tekniken bestämdes att ladda SSE-emulsion i rör. Ett alternativ hade varit att ladda med patronerad emulsion Kemix som användes i de tidigare försöksomgångarna. Den patronerade emulsionen har dock en något annorlunda densitet än densiteten hos SSE varför den patronerade emulsionen valdes bort. Det var också viktigt att fortsätta med SSE då avsikten med detta projekt var att undersöka sprickutbredning från just strängemulsion.

Laddningen med SSE utfördes hos Orica i Gyttop. Vi fick tillgång till en ny Mini-SSE-enhet som vi använde för att ladda emulsionen i plaströr. Rören var 1 m PVC-rör med innerdiametern 23 mm resp. 29 mm och med given densitet blev den teoretiska laddningsvikten 0,36 kg/m resp. 0,57 kg/m. Detta passade bra och var väldigt nära de 0,35 kg/m resp. 0,5 kg/m som vi ville åstadkomma. Längst fram på den ordinarie laddslangen sattes en slang med mindre diameter och för att underlätta laddningen så

skarvades ett antal rör ihop. Laddningen påbörjades och efter laddning av rören så märktes varje rör och kontrollvägdes. Laddning i vattenfyllda plexiglasrör blev också utförd, se Figur 32 och Figur 33. I Figur 33 kan man tydligt se ett avbrott i strängen, något som vi förmodar tidigare inträffat i de vattenfyllda horisontella hålen och som lett till detonationsavbrott. Emulsionen, med en densitet på ca 900 kg/m<sup>3</sup>, är lättare än vatten och kan flyta upp och riskerar alltså att brytas av. Emulsion har mycket kort överslagsförmåga och avbrott i stängen leder med all sannolikhet till detonationsavbrott.



**Figur 32: Bottenladdning**



**Figur 33: Strängladdning i vattenfyllt rör**

Vid granskning av de laddade rören såg man tydligt att det fanns spalter i emulsionen. Dessa spalter var i själva verket vattenfickor som låg inbakade i emulsionen. Hos Orica misstänkte man därför att dessa laddningar inte skulle vara lagringsbeständiga. Vattnet tillsätts vid laddning och används normalt som smörjmedel vid SSE-laddning.

Därför beslöts att laddningarna skulle provsprängas för bestämning av detonationshastigheten. Detta gjordes i tre omgångar. Dagen efter laddning visade VOD-mätningen i den klenare laddningen en hastighet på ca 3000 m/s. Efter 1 veckas lagring hade värdet sjunkit till 2700 m/s och efter 2 veckors till 2550 m/s. VOD-mätningarna framgår av Bilaga 8, Bilaga 9 och Bilaga 10. Misstanken om mindre god lagringsbeständighet var således befogad och därför beslöts att nyladdade rör direkt efter laddning skulle transporteras ner till Bårarp för att dagen därpå införas i hålen och sprängas.

Samma dag som sprängämnet tillverkades i Gyttorp så borrades de vertikala hålen i Bårarp. Borraren inväntade därefter vår sprängning för att efter denna omedelbart kunna starta borringen av tätsömmen. Så fort som sprängämnet kommit ner till Bårarp så påbörjades laddningen. Hålen laddades med dels referenssprängämnet Dynotex och dels med de strängemulsionsladdade rören enligt Tabell 4. Den exakta laddningsmängden framgår av Tabell 5 och Bilaga 11. I Tabell 5 kan man se laddningsvikterna för alla rörladdningar där rör 4 är laddningen längst ner i hålet. Hål 23, som saknas i Tabell 5, var ett reservhål som laddades med en blandning av 350 g och 500 g laddningar. Det framgår tydligt att det varit svårt att hålla en exakt laddningsvikt vid denna typ av laddningar men i snitt blev laddningsvikten 349 g i stället för 350 g samt 514 g i stället för 500 g. I en del rör fanns det vattenfickor som då skars bort. Figur 34 - Figur 35 visar laddningen.

I Figur 35 syns vattenfickorna i de laddade rören. Samtliga hål initierades med Orica i-kon<sup>®</sup> elektro-niksprängkapslar som är programmerbara inom 0 – 15 000 ms i steg om 1 ms med precisionen  $\pm 0,05$  ms inom 0 – 500 ms och  $\pm 0,01$  % inom 501-15 000 ms. De första 12 hålen initierades simultant, dvs. vid 0 ms och resterande hål med simulerad tändspridning, se Tabell 6. Vi utgick då från en tändspridning på 1-10 ms som sedan slumpmässigt varierades i dessa hål. Tidigare undersökningar har visat att tändspridningen måste vara mindre än 1 ms för att ”simultan” initiering skall ge en skadedämpande effekt.

**Tabell 4: Försöksplan för etapp 3.**

Hål	Laddning	Initiering med EPD
1-4	Dynotex 17 mm	Simultan
5-8	SSE 0,35	Simultan
9-12	SSE 0,5	Simultan
13-16	SSE 0,35	Simulerad tändspridning
17-20	SSE 0,5	Simulerad tändspridning
21-23	SSE 0,5 + vatten	Simulerad tändspridning

**Tabell 5: Nettovikt emulsion i de laddade rören**

Hål	Nettovikt g, rör				Snitt g
	1	2	3	4	
5	354	356	365	334	352
6	321	347	366	385	355
7	317	317	340	395	342
8	326	363	366	380	359
9	511	526	528	529	524
10	490	504	505	527	507
11	501	510	527	536	519
12	480	487	508	528	501
13	318	337	338	377	343
14	313	328	363	365	342
15	313	315	350	352	333
16	333	359	359	406	364
17	486	513	554	572	531
18	477	485	537	542	510
19	506	510	510	515	510
20	495	522	536	580	533
21	463	508	517	530	505
22	479	491	517	525	503





Figur 34: Laddning av emulsionsrör



Figur 35: Förvägsladdade emulsionsrör

Tabell 6: Upptändningstider för hål 13-23

Hål nr	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Intervalltid, ms	4	8	7	6	4	1	5	6	8	9	10

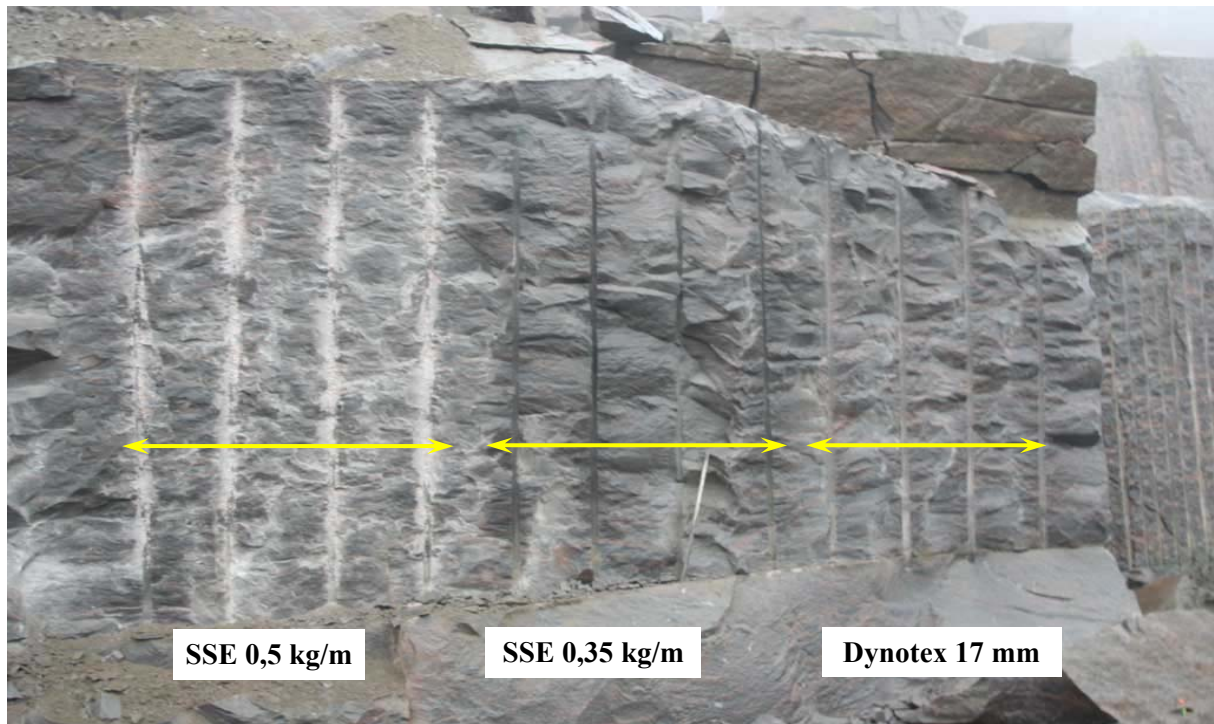
För kontroll av sprängämnet och kapslar så mättes VOD i tre hål, hål 12, 13 och 22.

#### 4.3.1 Resultat av sprängningen, försöksomgång 3

Resultatet från denna sprängning blev mycket bra med fina borrhålpipor från de flesta hål. Speciellt bra blev hål 1-12 som sprängdes simultant, se Figur 36. Borrhålpiporna från Dynotex och SSE 0,35 blev allra bäst och visar att man kan få en fin bergyta vid simultan sprängning med frikopplade laddningar. Det framgår också tydligt av bilden att hålen som laddats kraftigare (0,5 kg/m) gett en kraftigare påverkan på berget. Borrhålpiporna är här sönderrivna, som det brukar se ut då man haft lite mer sprängämne än nödvändigt (Olsson & Bergqvist 1993).

Den del i salvan som inte initierades simultant, hål 13-23, gav betydligt sämre bergyta, se Figur 37 - Figur 38. Här fick vi utkastade laddningar och odetonerade hål. Berget närmast de hål som detonerat var betydligt mer uppsprucket och berget där de vattenfyllda hålen suttit var mest skadat.

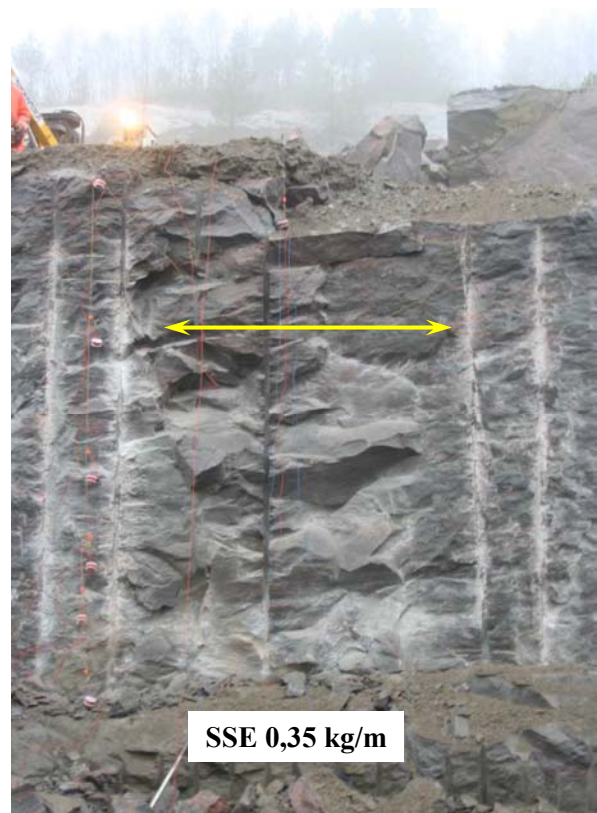
Orsaken till den sämre bergytan för hål 13-23 beror främst på att hålen detonerat med tändspridning men möjligen spelar även ett ökat hålavstånd och vattnet en roll.



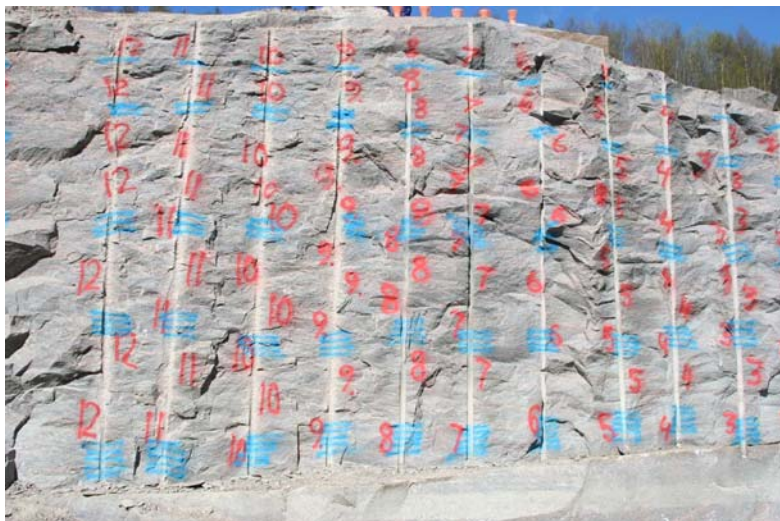
Figur 36: Borrhålspipor efter hål 1-12 från höger, simultan initiering med EPD



Figur 37: Pipor efter hål 17-23, simulerad Nonel-upptändning



Figur 38: Pipor efter hål 13-16, simulerad Nonel-upptändning



**Figur 39: Hål 2-12 från höger till vänster**

Resultatet från VOD-mätningen framgår av Bilaga 12. Detonationshastigheten för hål 12 (0,5 kg/m och simultant initierat) var 3419 m/s medan hastigheten för hål 13 (0,35 kg/m och ej simultant initierat) endast var 986 m/s. Hastigheten för hål 12 verkar riktig medan hastigheten för hål 13 är alldeles för låg. Det framgår också av Bilagan att VOD-kurvan är mycket ojämn, vilket dels kan bero på vattenfickor i laddningen och dels på påverkan från hål 12. Det framgår också att fördröjningstiden för hål 13 är 4,031 ms jämfört med planerade 4 ms och för hål 22  $4,031 + 5,006$  ms = 9,037 ms jämfört med planerade 9 ms. Överensstämmelsen ligger alltså väl inom angivna 0,05 ms för i-kon<sup>®</sup>-kapslarna.

Hålpiporna och pallytan märktes noggrant, se Figur 39, Figur 40 och Figur 41. En genomgång av samtliga hål i salvan visar att hål 1-12 med simultan initiering fungerat mycket bra, dock detonerade inte de två översta laddade rören i hål 6.

Detta kan bero på problem med vattenfickor i laddningarna. Från hål 13 fanns det ingen pipa kvar och från detta hål hittades två övre laddrören odetonerade. Från hål 14 fanns endast en kort pipa på 0,1 m och från detta hål hittades två laddrör, rör 2 och 3. Hål 15 har däremot detonerat bra med fin halvpipa medan hål 16 inte har detonerat alls. Samtliga laddningar från detta hål hittades. Hål 17-18 har detonerat och gett kraftiga bränningar vid hålpipan. Hål 19 har detonerat men halvpipa saknades. Från hål 20 fanns delar av en halvpipa kvar, ca 1 m, och i detta hål hade alla laddningar utom den översta detonerat. I hål 21 detonerade inte den översta laddningen och hålet uppvisade en skadad halvpipa. Från hål 22-23 fanns halvpipor, men med kraftiga bränningar. Området mellan hål 21-23 var rätt skadat och berget var flisigt.

Figur 42 visar en översikt av hål 13-23, intervalltider samt icke detonerade laddningar. Antalet odetonerade laddrör var 10 st. Från hål 1-12 vars laddningar initierades simultant hittades bara två odetonerade laddrör.

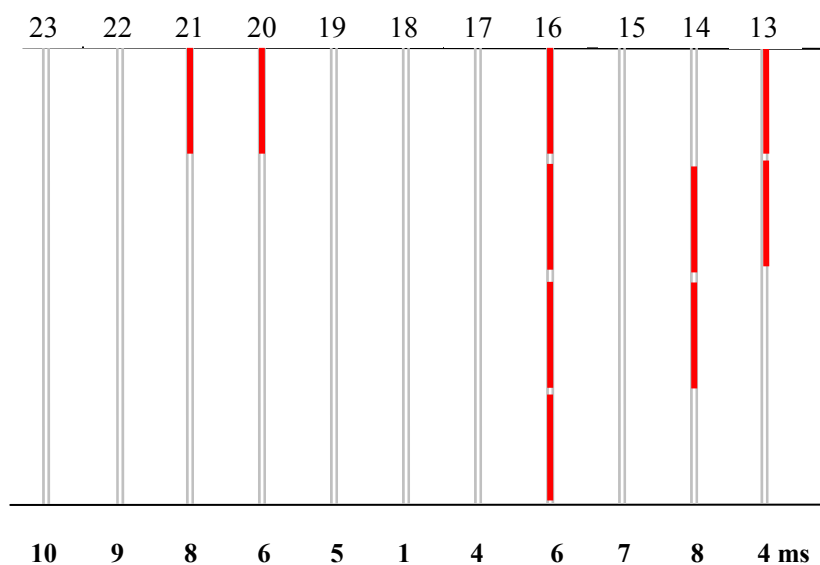




Figur 40: Hål 17-23 från höger till vänster



Figur 41: Hål 12-17 från höger till vänster



Figur 42: Översikt över hålen med tändspridning, utkastade rör markerade med rött

Försökspallen avbildades med stereofototeknik från 3G Software&Measurements (3gsm). Tekniken består i att man tar två stycken bilder som är något förskjutna. Ur perspektivförskjutningen och en vertikal längdskala i provet räknar programvara fram en 3D-modell av pallytan. Medföljande funktioner gör det möjligt att på olika sätt kvantifiera råheten. Några resultat visas i Bilaga 13.

Ur 3D-modellen kunde också hålavstånden på pall ytan mätas in. Hål 1-12 var bra borrade med ett snitt på 0,62 m medan hålavstånden i resterande hål blev för stora och varierade mellan 0,7 m till 1,0 m. Värdena visas i Bilaga 11.

Efter sprängningen av försökshålen borrades en tätsöm med hål ca 2 m bakom den sprängda raden. Hålavståndet i tätsömmen var ca 0,3 m och tätsömmen laddades med 40 g/m detonerande stubin (Detonex), varefter tätsömmen sprängdes.



**Figur 43: Resultat efter sprängning av tätsöm**



**Figur 44: Neddelning av block**



**Figur 45: Uppmärkta sågsnitt**



**Figur 46: Linsågning av block**

Denna sprängning gav ett stort antal stora block från den simultant sprängda delen och många mindre stenblock från hålen med tändspridning, se Figur 43. Blocken delades ner, se Figur 44, och märktes för sågning, se Figur 45. Blocken transporterades upp ur brottet till en fast linsåg där de sedan sågades vinkelrät mot hålen i den sprängda försöksraden, se Figur 46.

Sågytorna påfördes penetrantvätska och sprickorna från sprängningen kunde karteras. Figur 47 - Figur 48 visar några exempel på hur sprickbilden såg ut för de hål som detonerats simultant. Bilder på alla sågade ytor visas i Bilaga 14.





**Figur 47: Sprickor hål 1-3, Dynotex, simultan initiering**

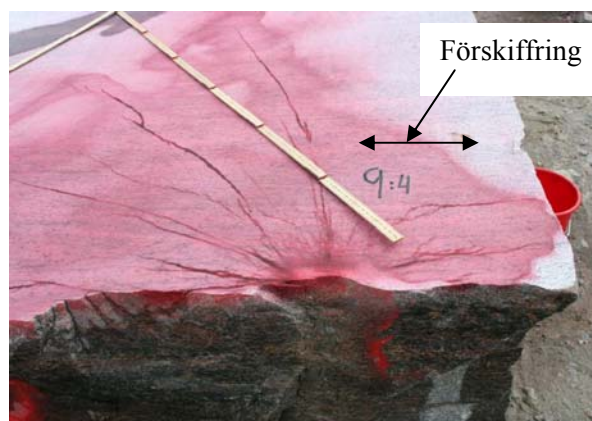


**Figur 48: Sprickor hål 4-6, SSE 0,35 kg/m, simultan initiering**

Det fanns som väntat få sprickor från Dynotex och SSE 0,35 kg/m med en simultan initiering i hål 1-8. Medelvärde av den maximala spricklängden var ca 15 cm för såväl Dynotex som SSE 0,35 kg/m. Sprickbilden är enkel med endast ett fåtal sprickor. För Dynotex syns tydligt att sprickorna orienterar sig i bergväxtens riktning vilket inte är lika tydligt för SSE 0,35 kg/m. Kanske beror detta på att mängden sprängämne är mindre för Dynotex samt att Dynotex har en lägre detonationshastighet som därför bör ge ett lägre borrhålstryck och en svagare spricktillväxt än SSE 0,35 kg/m.



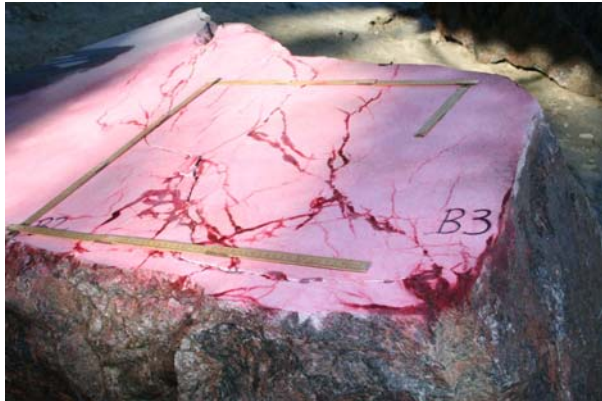
**Figur 49: Sprickor hål 9-12, SSE 0,5 kg/m, simultan initiering**



**Figur 50: Sprickor hål 9 sågsnitt 4, SSE 0,5 kg/m, simultan initiering**

Sprickfrekvensen ökar med sprängämneskoncentrationen, se Figur 49 - Figur 50. Hål 9-12 var laddade med SSE 0,5 kg/m och initierades simultant. Det sprickmönster som syns tydligt i Figur 50 (hål:sågsnitt) 9:4 är typiskt för sprängämnen med hög detonationshastighet och/eller med en större laddningsmängd, alltså ett stort antal fina sprickor närmast hålet. Detta behöver nödvändigtvis inte betyda så mycket för bergets slutliga stabilitet men kan kanske påverka mängden nedskrotat berg. Förskiffningen framgår också av Figur 50. Figur 51 visar sprickutbredningen från SSE 0,9 kg/m initierat med Nonel. Här framgår att berget blivit kraftigt söndersprängt.

Från området där hålen detonerat med simulerad tändspridning (hål 13-23) kunde bara ett block tas ut, beroende på att berget här var alldeles för söndersprucket. Det fanns många små stenar som var för små att säga. Figur 52 visar sågytan från det enda blocket i denna sektion.



**Figur 51: SSE 0,9 kg/m, Nonel-initiering**



**Figur 52: Sprickor bakom hål 15, SSE 0,35 kg/m, simulerad Nonel-initiering**

Tändspridningen har medfört att en del hål inte detonerat, och följaktligen inte heller gett någon sprickbildning, medan andra hål skadat berget ordentligt. En enkel uppskattning säger att sprickdjupet bör ha kunnat vara upp till halva försättningen för den tätsöm som sen borrades för blockuttag, dvs. upp till 1 m.

Detta är ett klart bevis på hur stor sprickdämpande effekt riktigt simultan initiering av frikopplade laddningar ger vid skonsam sprängning.

## 5. SAMMANFATTNING AV FÄLTFÖRSÖKEN

Totalt karterades i detta projekt 24 sågsnitt som oftast täckte flera hål. Alla spricklängdsvärden finns tabellerade i Bilaga 15. I Tabell 7 har resultaten av sprickkarteringen av samtliga försök sammanställts. Värdena utgör medelvärden av de längsta spricklängderna från mitthålen i varje snitt. Dessa värden har angetts med fetstil i Bilaga 15.

I våra försök var det ingen större skillnad på spricklängden mellan 17 mm Dynotex och SSE 0,35 kg/m. Däremot ökar spricklängden med SSE 0,5 kg/m i stort sett i proportion till den större laddningskoncentrationen. Förekomsten av vatten i hålen med SSE 0,5 kg/m uppskattas ge upp till 1 m långa sprickor. Foliationens betydelse för sprickbildning framgår tydligt. Spricklängden fördubblades vid sprängning parallellt med foliationsriktningen jämfört med sprängning snett mot foliationen.

Sprickbildningen när pallfronten stryker parallellt foliationen tenderar gå längs denna varför sprängsprickornas inträngningsdjup tenderar att vara mindre än angivna spricklängdsvärden. Dessutom finns en möjlighet att skillnaden i spridning i den simultana upptändningen spelat in. Värdena parallellt foliationen mättes i försöksomgång 2 när hålen initierades vid 5000 ms med spridningen 1 ms. Värdena snett foliationen erhöles vid 0 ms med spridningen 0,05 ms. Spridningen 1 ms har tidigare visat sig vara för stor för att ha en skadedämpande effekt.

**Tabell 7: Sammanställning av spricklängder från utförda försök**

Sprängämne	Initiering	Spricklängd (cm)		
		Snett foliation spridning 0,05 ms	Parallellt foliation spridning 1 ms	Tidigare resultat spridning 0,05 ms
Dynotex 1 (17)	Simultan	16	30	10-15
SSE 0,35	Simultan	16	55	15-30 <sup>1)</sup>
SSE 0,5	Simultan	26	-	-
SSE 0,5	Ej simultan	-	36	-
SSE 0,9	Ej simultan	-	60	-
Kemix A (17)	Simultan	-	18	-

*Not 1: 15-20 cm i Södra Länken och 20-30 cm i Vånga*

Resultaten från våra försök kan kort sammanfattas i följande punkter:

- Då vi laddat med 0,35 kg/m blir laddsträngen jämn men den riskerar att bli ojämn vid högre laddningskoncentrationer.
- Det var svårt att få en kontrollerad bottenladdning vid laddning med strängemulsion.
- Simultan initiering ger bästa resultat, dvs. jämnare vägg och kortare sprickor.



- Olika elektronisprängkapslar ger olika tändspridning. Detta är viktigt då tidigare undersökningar visat att upptändningen sannolikt måste sprida mindre än 1 ms för att en sprickdämpande effekt skall uppstå.
- Då initieringen inte är simultan finns stor risk för ryckare, utkast av laddningar och bergskador.
- Vatten i hål ger stora skador på berget.
- Strukturen i berget spelar stor roll för spricklängden. Spricklängder kan fördubblas vid sprängning parallellt med foliationen.
- SSE 0,35 kg/m gav i vår undersökning ungefär lika långa sprickor som 17 mm Dynotex i torra hål.
- SSE 0,5 kg/m gav ca 50 % längre sprickor än SSE 0,35 kg/m vid simultan initiering i torra hål.
- SSE 0,5 kg/m uppskattas kunna ge upp till 1 m långa sprickor vid ej simultan initiering i våta hål.

I grunden har alltså SSE strängladdning visat sig kunna ge sprick- eller skadezoner av samma djup som de klenaste rörladdningar som normalt används vid skonsam kontursprängning. Lägg till att tekniken är rationell och enkel och därför används alltmer, vilket kommer entreprenörer och beställare av tunnelarbeten till godo.

I våra försök användes äldre utrustning vilket gav problem med bottenladdningens längd. Med den modernare utrustning som nu finns är enligt Orica detta problem under kontroll. Effekten av den ojämna laddsträngen vid laddningskoncentrationen 0,5 kg/m märks sannolikt inte vid normalt tunnelarbete eftersom även andra omständigheter varierar betydligt.

Vi såg också att laddsträngen kan skjuvas av vid laddning i vattenfyllda hål, sannolikt därför att den är lättare än vattnet. Om konturhålen är torra eller som brukligt lutas något uppåt borde detta inte inträffa.

Vattenfickor i laddsträngen har sannolikt medverkat till att strängemulsionens detonationshastighet sjunkit från ca 3000 m/s till 2500 m/s på två veckor. Så småningom kan strängen inte detonera. Då en laddad tunnelsalva normalt sprängs inom något dygn är inte heller detta ett problem.

Avskjuvade laddsträngar medför sannolikt detonationsavbrott men pyroteknisk upptändning av rörladdningar vid skonsam kontursprängning under jord orsakar både detonationsavbrott och ryckare som kan ge odetonerade laddningar på berghögen. Bortsett från säkerhetsriskerna med detta bidrar en mindre väl fungerande sprängteknik till onödigt stora kväveutsläpp till omgivningen.

Vår uppfattning är att rätt användning av elektronisprängkapslar med simultan upptändning minskar risken för ryckare i konturen och att det också kan ge grundare sprängsprickor, se avsnitt 6.

## 6. FÖRSLAG TILL NY SKADEZONSTABELL

### 6.1 Mer om tidigare skadezonstabeller

Bakgrunden till tidigare skadezonstabeller för skonsam sprängning diskuteras ingående av Ouchterlony & Olsson (2000). Ursprunget finns i arbeten i Göteborg på 1970-talet (Sjöberg 1979) där matchande mätningar av sprick- eller skadezonsdjup och vibrationer utfördes. Den svenska skadezonmodellen (Holmberg & Persson 1979) kom sen att starkt påverka utformningen av använda skadezonstabeller för skonsam sprängning (Vägverket 1995, JärnvägsAMA 96, AnläggningsAMA 98). Historiken har sen ytterligare belysts (Dalmalm & Ouchterlony 2007).

De två första innehåller samma tabell med produkter, tillhörande laddningsdiameter och motsvarande laddningskoncentration  $q$  (ekvivalent kg DynamexM/m). Detta ger bedömt sprick- eller skadezonsdjup  $R_c$ (m) vilket sen får jämföras med de krav som ställs för utförandet av skonsam sprängning i aktuellt objekt. Tabellen kan ersättas av följande enkla formel (Ouchterlony & Olsson 2000, ekv. 4):

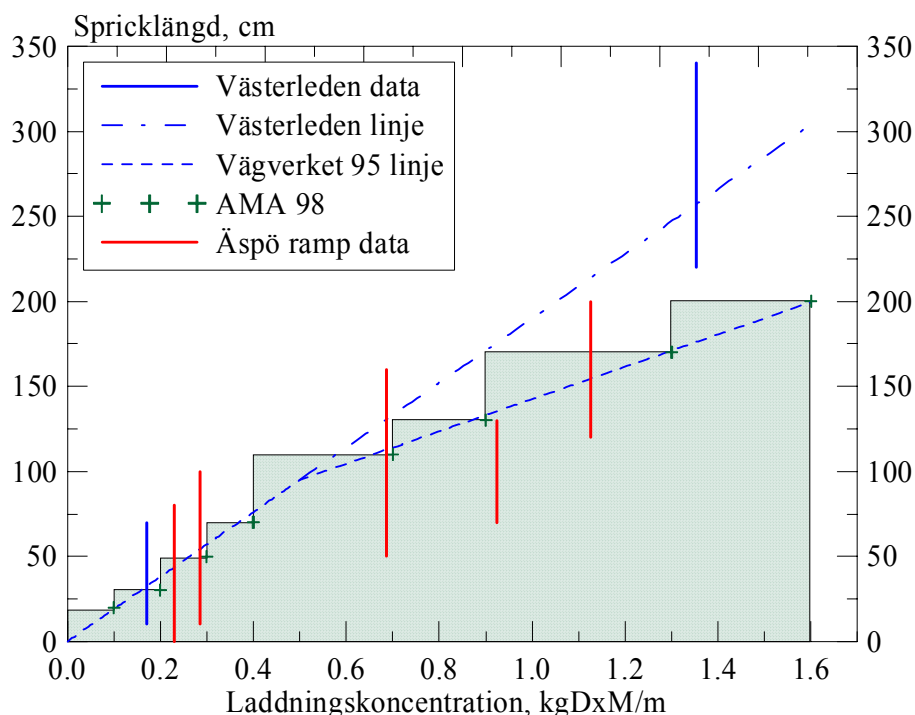
$$R_c = 1,9 \cdot q \text{ när } q < 0,5 \text{ kg/m och } R_c = 0,95 \cdot (q+0,5) \text{ när } q > 0,5 \text{ kg/m.} \quad (1)$$

Det största värdet i tabellen gäller Ø39 mm Dynamex i Ø45-51 mm hål, dvs.  $q = 1,6$  kg/m vilket ger  $R_c = 2,0$  m. Sambandet  $R_c(q)$  kan också åskådliggöras i ett diagram som en bruten rät linje. För en given sprick- eller skadezon ger linjen den laddningsgräns som inte får överskridas.

AnläggningsAMA98 utgör en förenkling i och med att produktnamn och laddningsdiameter försvunnit. I stället utgår tabell CBC/2 från ett antal klasser med teoretiskt skadezonsdjup med motsvarande högsta tillåtna laddningskoncentration  $q$ (kgDxM/m). Skadezonsdjupet är kopplat till en tidigare tabell CBC/1 med bergschaktningstoleranser med nästan samma värden för det teoretiska skadezonsdjupet. I CBC/1 sägs det att: ”Laddningskoncentrationen skall vara högst enligt tabell CBC/2 för angiven teoretisk skadezon”. I diagramform ersätts den brutna räta linjen av en trappstegformad gränskurva, se Figur 53, som är något konservativ jämfört med den tidigare brutna linjen.

Förenklingen uppvägs av att under tabell CBC/2 finns texten: ”Vid bedömning av teoretiskt skadezonsdjup skall hänsyn tas till: -frikoppling, vatten i hål, bergets egenskaper, typ av upptändning, laddningslängd och verklig krondiameter”. Texten syftar på resultatet av arbeten vid SveBeFo (Olsson & Bergqvist 1995, 1997; Olsson 2000), jfr Bakgrunden i kapitel 1.

Förutom gränskurvorna för skadezonsdjupet från Vägverket (1995) och AnläggningsAMA 98 så visar Figur 53 också två uppsättningar mätdata för spricklängder som mätts efter skonsam sprängning med Nonel-upptändning (Sjöberg m.fl. 1979 & Ouchterlony m.fl. 1991). I fem fall av sex ligger spricklängderna på eller mycket nära gränskurvorna, vilka alltså är en rimlig återgivning av förhållandena i svenska urberg. Tabellernas omfattande användning i praktiken visar också deras rimlighet.



**Figur 53 : Spricklängd eller skadezonsdjup som funktion av laddningskoncentration; jämförelse mellan tabellvärden och försöksdata**

Nonelkapslar har pyroteknisk fördröjning och initieringstiden för kapslar med samma tändarnummer sprider mycket, särskilt för de höga nummer som normalt används i konturen, nr 50, 55 och 60. Med intervalltider på 500 ms så är spridningen ca 150 ms. Detta omöjliggör i de flesta fall någon form av brytningssamverkan mellan hålen, hålen skjuts i praktiken individuellt.

## 6.2 Om inverkan av olika faktorer vid simultan upptändning

I AnläggningsAMA ges inga specifika anvisningar för hur man skulle ta hänsyn till eller beräkna inverkan av faktorerna under tabell CBC/2. Underlaget för sådana beräkningar ges av Ouchterlony & Olsson (2000) och Olsson & Ouchterlony (2003). Den senare rapporten innehåller inte ett fullständigt formelunderlag, det redovisas i Bilaga 16. Formlerna representerar försöksresultat som erhållits med simultan upptändning, dvs. med elektronik-kapslar för vilka tändspridningen är mindre än 1 ms. De innehåller relativt många parametrar; för sprängämnet behövs explosionsenergin (MJ/kg) och detonationshastighet VOD (m/s) samt dess variation med laddningsdiametern, för berget dess densitet ( $\text{kg/m}^3$ ), P-vågshastighet (m/s) och brottseghet ( $\text{MPa}/\text{m}$ ) samt för borrhålet diametern, om det är vattenfyllt och avståndet S till nästa konturhål relativt försättningen B. Den betydelsefulla kopplingsgraden  $f$  ges t.ex. av  $f = \frac{\varnothing_{\text{laddn}}}{\varnothing_{\text{hål}}}$ .

En i flera fall belagd erfarenhet, inklusive i denna undersökning, är att för förhållanden som är normala vid skonsam kontursprängning; dvs. i grova drag laddningskoncentrationer  $q \leq 0,5 \text{ kg/m}$ , kopplingsgrad  $f < 0,5$  och  $S/B < 1$ , så ger den simultana upptändningen, allt annat lika, ca hälften så stort

sprick- eller skadezonsdjup som den pyrotekniska Nonel-upptändningen. Detta uttrycktes av Olsson & Ouchterlony (2003), ekv. 17-19, som en kombinerad korrektionsfaktor för hålsättning (h) och tändfördröjning (t)

$$F_h \cdot F_t = 1 \text{ när } S/B \leq 1, \quad F_h \cdot F_t = S/B \text{ när } 1 < S/B \leq 2 \text{ och } F_h \cdot F_t = 2 \text{ när } S/B > 2. \quad (2)$$

När  $S/B > 2$  så finns inte någon samverkan mellan stötvågorna från närstående konturhål som dämpar den radiella sprickbildning som definierar skadezonsdjupet, inte ens vid simultan upptändning. Hålens bergbrytning fungerar då lika enskilt som vid pyroteknisk upptändning.

När  $S/B$  minskar och hålen kommer närmare varandra ökar vid simultan upptändning skadedämpningen och när  $S/B = 1$  är den fullt utbildad och korrektionsfaktorn hälften så stor. Data visar till och med en fortsatt tendens till minskande korrektionsfaktor när  $S/B$  minskar ytterligare men för att vara på säkra sidan togs detta inte med i ekvation 2. En  $\varnothing 22$  mm laddning av Gurit (0,3 kgDxM/m) ger i  $\varnothing 51$  mm hål i Vångagranit med  $S/B = 0,8$  radiella sprickor med längden ca 25-40 cm (Ouchterlony & Olsson 2000). Enligt Figur 53 så skulle denna laddning med Nonel-upptändning ge ett skadezonsdjup på ca 50-70 cm.

För att tillgodogöra oss den skadedämpande effekten fullt ut vid simultan upptändning så måste alltså  $S/B \leq 1$ , vilken den normalt också är vid pyroteknisk upptändning. Detta medför också att tendensen till bågformade sprickor, som kan ge bomt berg, minskar avsevärt. (Ouchterlony & Olsson 2000, se Figur 5).

Kopplingsgraden  $f$  är mycket betydelsefull, vilket visas av Figur 4 hos Ouchterlony & Olsson (2000). Den  $\varnothing 22$  mm laddning av Gurit som i  $\varnothing 51$  mm hål i Vångagranit vid simultan initiering gav radiella sprickor med längden ca 25-40 cm, gav i  $\varnothing 64$  mm hål ca 15-25 cm långa sprickor. Allt övrigt lika gav en likadan laddning i  $\varnothing 24$  mm hål ett betydligt komplicerat sprickmönster som sträckte sig minst 90-100 cm in i berget. Skadezonen innehöll både radiella sprickor som utgår från borrhålen och andra sprickor som verkar börja och sluta inuti berget. Se Figur 54.



Figur 54: Bild från försök med  $\varnothing 22$  mm Guritladdning i  $\varnothing 24$  mm hål i Vånga

Den komplicerade sprickbilden i Figur 54 tyder på att den simultana upptändningen i detta fall inte verkat skadedämpande utan tvärtom genom stötvågssamverkan förstärkt sprickbilden jämfört med Nonel-upptändning. Liknande sprickbild har fulladdade 51 mm hål med Emulet 20 gett, Olsson & Bergqvist (1995) Figur 17. Denna typ av skadeförstärkning börjar bli den accepterade mekanismen bakom det förbättrade styckefall som man får när mycket korta intervall används vid fragmenterings-sprängning (Vanbrabant & Espinosa 2006).

### 6.3 Jämförelse av tidigare data, skadezonstabell och här uppmätta sprickdjup

Detaljeringsgraden i formelunderlaget i Bilaga 16 är för stor och sprickbilden för varierad för att effekten av användning av elektronisprängkapslar (simultan upptändning) skall kunna tas med i en skadezonstabell av typen CBC/2 i AnläggningsAMA 98 utan avsevärda förenklingar. En första förenkling är att indela sprängämnen som används i konturen eller sulan i en tunnalsalva i olika klasser; låg-VOD sprängämne av pulvertyp, emulsionssprängämnen med högre VOD och dynamiter med högre densitet och explosionsenergi.

**Tabell 8: Sprängämnesklasser och exempel på sprängämne**

Sprängämnestyp	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Explosionsenergi MJ/kg	Viktstyrka %	Gasmängd liter/kg	VOD m/s
Pulver	1000-1250	1,2-3,4		200-950	1300-2300
- ex: Dynotex 1 <sup>a</sup>	1000	3,4	75	930	2170 (17 mm)
Emulsion	1050-1200	3,2-3,8		900-950	4000-5000
- ex: Kemix A <sup>b</sup>	1120	3,8	71(17), 88	950, 920	4550 (22 mm)
Dynamit	1350-1450	4,3-4,5		850-900	2500-6500
- ex: Dynamex <sup>c</sup>	1400	4,4	100	885	3000

Not a: Dynotex 1 från Orica motsvarar ungefär f.d. Gurit från Dyno Nobel

b: Kemix A rörladdning från Orica, VOD(Ø) data som för Kimulux 42 från Kimit AB

c: Referenssprängämne, viktstyrka 100%

Tabell 8 ger en ungefärlig indelning med egenskaper och några typsprängämnen som ingått i äldre undersökningar och för vilka det finns nödvändiga data, t.ex. detonationshastighetens beroende av laddningsdiametern, VOD(Ø), se t.ex. Olsson & Ouchterlony (2003). Alla tre typsprängämnen finns t.ex. med i den gamla skadezonstabellen som gäller Nonelupptändning, (Vägverket 1995). Härigenom kan vi utnyttja formelunderlaget i Bilaga 16 för att beräkna jämförbara sprick- eller skadezonsdjup vid sprängning med simultan upptändning i svenskt urberg.

Vi ansätter densiteten 2650 kg/m<sup>3</sup>, P-vågshastigheten 5500 m/s och brottsegheten 2,0 MPa√m. Tabell 9 visar vilka laddnings- och håldiametrar som använts för sprängämnen och framräknade sprick- eller skadezonsdjup. Viktstyrkedata i Tabell 8 har använts för att beräkna den ekvivalenta laddningskoncentrationen. Effekten att skadezonsdjupet  $R_c$  minskar med ökande frikoppling syns tydligt.

**Tabell 9: Beräknat ungefärligt sprick- eller skadezonsdjup  $R_c$  för simultan upptändning**

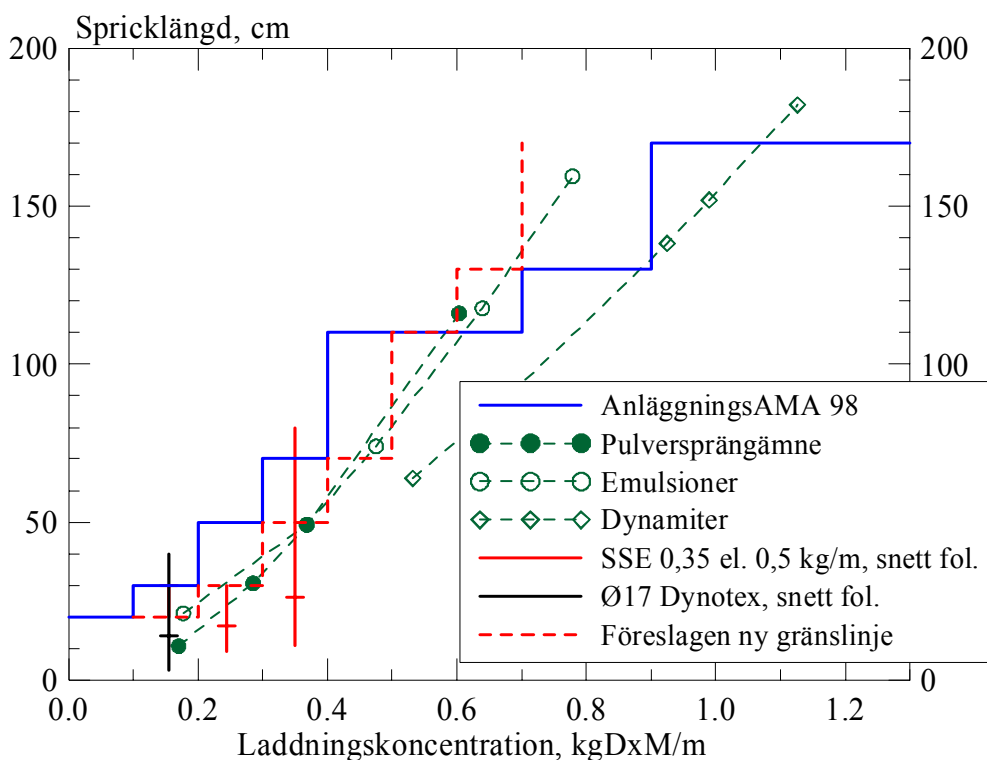
Håldiameter:			45	48	51	54	57	64
Laddn.- diam.	Laddn.- konc.	Ekviv. konc.	$R_c$	$R_c$	$R_c$	$R_c$	$R_c$	$R_c$
mm	kg/m	kgDx/m	cm	cm	cm	cm	cm	cm
<i>Pulver:</i>								
17	0,23	0,17	12	11	11	10 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>
22	0,38	0,29	35	33	31	29	27	24
25	0,49	0,37	56	52	49	46	44	39
<i>Emulsion:</i>								
17	0,25	0,18	24	22	21	20 <sup>a</sup>	19 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>
22	0,42	0,37	56	52	49	46	44	39
25	0,54	0,48	84	79	74	70	66	58
29	0,73	0,64	134	125	118	111	105	93
32	0,88	0,78	182	170	160	150	142	126
<i>Dynamit:</i>								
22	0,53	0,53	73	68	64	60	57	50
25	0,69	0,69	104	97	91	86	81	72
29	0,92	0,92	158	147	138	130	123	109
30	0,99	0,99	173	162	152	143	135	120
32	1,13	1,13	208	194	182	172	162	144

*Not a: Normalt används inte laddningar med en diameter < 1/3 av håldiameteren*

I Figur 55 jämförs sprick- eller skadezonsdjupen i Tabell 9 för Ø51 mm hål med gränskurvan för Nonel-upptändning ur tabell CBC/2 i AnläggningsAMA 98. De streckade kurvorna för sprick- eller skadezonsdjupen för simultan upptändning av emulsions- och pulversprängämne ligger som synes betydligt under gränskurvan i AMA 98 för Nonel, dvs. pyroteknisk upptändning, så länge som laddningskoncentrationen är lägre än 0,6 kg/m. För större värden ligger den över gränskurvan.

Motsvarande kurva för Dynamit ligger betydligt lägre än kurvorna för emulsions- och pulversprängämnen. Det beror på att ett konstant lågt VOD-värde antagits, 3000 m/s. Formeln för  $R_c$  i Bilaga 16 är väldigt känslig för VOD och ett högre VOD-värde skulle ha gett betydligt djupare sprick- eller skadezon. Å andra sidan finns inga försöksserier gjorda där sprick- eller skadezonsdjupet uppmätts vid simultan upptändning av hål med Dynamit.

I Figur 55 finns också spricklängdsvärden från denna undersökning inlagda, särskilt från försöksserie 3 där pallytan stryker snett foliationen. När pallfronten stryker längs pallfronten blir spricklängderna visserligen långa men sprängsprickornas inträngningsdjup inte så stort eftersom sprickutbredningen tenderar att gå parallellt med den fria ytan. De senare spricklängdsvärdena i Tabell 7 ligger minst en faktor 2 högre men omräkningen till sprick- eller skadezonsdjup torde kompensera för den ökningen.



Figur 55: Sprick- eller skadezonsdjup mot laddningskoncentration; mätvärden, bl.a. SSE strängemulsion, och beräknade värden jämförda med gränskurvor i skadezonstabell

Mätvärdena för simultan initiering av SSE strängemulsion 0,35 och 0,5 kg/m och Dynotex 1 anges som intervall för alla mätvärden för alla mitt- och kanthål i Bilaga 15. Laddningskoncentrationen har räknats om med de viktstyrkevärden som Orica anger för sina produkter.

Tabell 10: Spricklängds- eller skadezondata för simultan skjutning snett foliationen

Sprängämne	SSE 0,35 kg/m	SSE 0,5 kg/m	17 mm Dynotex 1
Viktstyrka, %	70	70	75
Laddn.konc q, kgDx/m	0,25	0,35	0,16
Spricklängd $R_c$ , cm	9-30	11-80	3-40

Medelvärdena i Tabell 10 syns som horisontella streck i Figur 55. Alla tre mätvärdesstaplarna ligger väl under gränskurvan och visar god överensstämmelse med de beräknade värdena för simultan initiering. De spricklängdsdata som erhållits i nuvarande undersökning ligger alltså väl i linje med tidigare erfarenheter.

#### 6.4 Förslag till ny skadezonstabell

En skonsam sprängning av bergkonturer med simultan upptändning av frikopplade laddningar med  $q < 0,6$  kg/m kan alltså ge en betydande skadedämpande effekt även när strängemulsion används. Ett sätt att ta hänsyn till detta är att parallellförflytta gränskurvan i Figur 55 till höger, dvs. öka på tillåten

laddningskoncentration med 0,1 kg/m. På detta sätt ändras inte de bergschaktningstoleranser och motsvarande angivna teoretiska skadezon djup som AnläggningsAMA 98 utgår från i tabell CBC/1 och CBC/2. Användning av en korrektionsfaktor liknande ekvation 2 skulle ändra på dessa värden, vilket är mindre lämpligt ur praktisk synvinkel.

Härigenom blir det nya förslaget till skadezonstabell följande omarbetning av CBC/2. Notera att teoretiskt skadezon djup i denna och andra refererade undersökningar motsvarar uppmätta spricklängder. Tabellunderlaget består alltså av spricklängdsmätningar varför begreppet skadezon djup innehåller någon form av bedömning av att dessa sprickor är skadliga för konstruktionen. Detta bör strängt taget beställaren och konstruktören ta ställning till i det enskilda fallet. För att det varit brukligt används ändå termen skadezon här, men i betydelsen sprickzon.

**Tabell 11: Förslag till utökad skadezonstabell**

Teoretiskt skadezon djup i m enligt figur CBC/1, högst	Laddningskoncentration i kg DxM/m, högst	
	Nonel	simultan <sup>a</sup>
0,2	0,1	0,2
0,3	0,2	0,3
0,5	0,3	0,4
0,7	0,4	0,5
1,1	0,7	0,6
1,3	0,9	(0,7)
1,7	1,3	-
2,0	1,6	-

*Not a: Förutsättningarna för användning av dessa värden ges nedan*

Not a innebär att den ökning av laddningskoncentrationen för ett visst största skadezon djup som anges i kolumnen för simultan initiering bara är tillåten under förutsättning att

- Borrhålet har diametern  $48 \text{ mm} \leq \varnothing_{\text{hål}} \leq 54 \text{ mm}$  i normalt urberg och är bevisat torrt.
  - Kravet på torra hål torde även gälla Nonel-upptändning.
  - Runt våta hål kan skadezon djupet bli 2-4 gånger större än vad tabellen anger.
  - Om håldiametern  $\varnothing_{\text{hål}} > 54 \text{ mm}$  så överskattar sannolikt Tabell 7 skadezon djupet för en given laddningskoncentration.
  - Om håldiametern  $\varnothing_{\text{hål}} < 48 \text{ mm}$  så kan effekten på skadezon djupet uppskattas genom faktorn  $(51/\varnothing_{\text{hål}})^{1,05}$ . För ett 45 mm hål innebär det en 15% djupare skadezon.
  - Laddningar med diametern 17 mm bör inte användas i större hål  $\varnothing_{\text{hål}} = 51 \text{ mm}$ .
- Laddningskoncentrationen  $q \leq 0,6 \text{ kgDxM/m}$  och hålavståndet  $S/B < 1$ .
  - Om  $q > 0,6 \text{ kgDxM/m}$  så ger simultan initiering större skada än Nonel-upptändning. Detta markeras i tabellen av parentesen runt värdet 0,7 i kolumnen för simultan upptändning.
  - Om  $S/B > 1$  ökar skadezon djupet med faktorn S/B tills dubbla djupet nåtts.



- Strängemulsion med 0,35 och 0,5 kg/m har efter omräkning med viktstyrka till kgDxM/m visat sig falla väl inom tabellens skadezonsgrenser.

3. Initieringen är simultan väl inom 1 ms.

- Notera att vissa typer av elektronisprängkapslar har en spridning som är större än 1 ms vid de långa tider som normalt används i tunnelkonturer, 5000-6000 ms.

Siffran 0,7 kg/m som högsta laddningskoncentration i kolumnen för simultan initiering i Tabell 11, när skadezonsdjupet skall vara mindre än 1,3 m, är satt inom parentes för att markera att någon sprickdämpningseffekt inte lägre finns vid simultan initiering, tvärtom. Högsta tillåten laddningskoncentration vid Nonel-initiering är ju större, 0,9 kg/m. Detta syns också i Figur 55 genom att de två trappstegskurvorna byter plats vid 0,6 kg/m.

Den SSE strängemulsion som använts i våra försök, 0,35 och 0,5 kg/m, motsvarar 0,25 och 0,35 kg DxM/m. Vid Nonelupptändning ger tabellen motsvarande teoretiska skadezonsdjup om högst 0,5 och 0,7 m. Vid simultan upptändning blir motsvarande skadezonsdjup mindre till följd av skadedämpningen, högst 0,3 och 0,5 m. Genom att ändra laddningskoncentrationen och viktsyrkan kan strängemulsionen fås att hamna i andra skadezonsklasser i tabellen

Slutsatsen om att SSE vid 0,5 kg/m i vått håll givit spricklängder på över 1 m jämfört med 10-30 cm för mitthål och högre för kanthål stödjer tidigare observationer om att våta hål vid normal frikoppling kan ge 2-4 ggr djupare skadezon än torra hål.

I denna undersökning användes två olika typer av elektronisprängkapslar för att åstadkomma simultan initiering av laddningarna i försöken. I försöksomgång 1 och 2 användes HotShot från DetNet som programmerats att detonera efter 5000 ms, se avsnitt 4.1 och 4.2. De har en programmerbar fördröjning från 0 till 20000 ms i steg om 1 ms och en maximal spridning om  $\pm 0,02\%$ . För tider på 5000 ms och över blir följaktligen den maximala spridningen minst 1 ms. Då är det stor risk att den skadedämpande effekten försvinner, vilket verkar stämma väl med gjorda observationer i vår undersökning.

I försöksomgång 3 initierades laddningarna med i-kon<sup>®</sup> elektronisprängkapslar från Orica som är programmerbara inom 0-15 000 ms i steg om 1 ms med spridningen  $\pm 0,05$  ms inom 0-500 ms och  $\pm 0,01\%$  inom 501-15 000 ms. Den simultana initieringen programmerades i våra försök till 0 ms så spridningen var 0,05 ms. Vid 5000 ms skulle i-kon ge spridningen 0,5 ms. Detta är betydligt bättre än 1 ms men vi har inga systematiska undersökningar av spridningar av den storleken och denna undersökning ger inget säkert besked på den punkten. Att en skadedämpande effekt verkligen erhålls vid spridningen 0,5 ms bör förmodligen styrkas med försök.

För en salva i en vägsärning med total längd av högst 500 ms så blir motsvarande spridningsvärden 0,1 ms för HotShot och 0,05 ms för i-kon. Båda värdena torde vara tillräckligt små för att ge den önskade skadedämpningen.

## 7. ERKÄNNANDE

Ett stort tack skall framföras till Rolf Persson och hans personal i Emmaboda Granits blockstensbrott i Bårarp. Det är mycket svårt att hitta lämpliga stenbrott för dessa tester och ännu ovanligare att där hitta lika hjälpsamma och entusiastiska personer som Rolf.

Ett stort tack också till Bengt Niklasson och Skanska i Hallandsås, Bengt-Åke Eng och Kåre Fuglesteg, som lånade ut en borrhög och personal.

Vi riktar också ett tack till S-O Båvik, f.d. Vägverket för hans långvariga stöd för arbetet med skonsam sprängning.

## 8. REFERENSER

3G Software & Measurement: [www.3gsm.at](http://www.3gsm.at).

AnläggningsAMA 98 (1999). Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten, avsnitt CBC: Bergschakt, sid. 41-53. Svensk Byggtjänst.

Dalmalm, T & F Ouchterlony (2007) Drivning av tunnlar i Sverige – Från krav på skadezon i konturen till verifiering av bärförmåga. *Fjellsprengningsteknikk, bergmekanikk, geoteknikk*, sid 10.1-10.32. J Kristiansen m.fl. red, Norsk jord- og fjellteknisk forbund, Oslo.

Detnet: [www.detnet.com](http://www.detnet.com).

Emmaboda Granit AB: [www.emmabodagranit.se](http://www.emmabodagranit.se).

Holmberg, R & P-A Persson (1979). Design of tunnel perimeter blasthole pattern to prevent rock damage. I Tunneling'79, *Proc 2nd Intl Symp on Tunnelling* 280-283, Inst Mining & Metallurgy, London.

JärnvägsAMA 96 (1996). Banverkets komplement till AMA 83, Berg. Tekniskt meddelande TM 95-060, Banverket, Borlänge, 1996-09-01.

Olsson, M (1998). *Skadezon från strängemulsionsladdade hål*, Nitro Nobel's Underjordsseminarium, 1998, Nitro Nobel.

Olsson, M (1999). *Skadezon från strängemulsionsladdade hål*, Nitro Nobel's Underjordsseminarium, 1999, Nitro Nobel.

Olsson, M (2000). *Sprickutbredning i kvarstående berg - Arbetsrapport från försöksperioden 1997-99*, SveBeFo Rapport K11, Stockholm.

Olsson, M & I Bergqvist (1993). *Sprickutbredning i berg vid skonsam sprängning*, SveBeFo Rapport 3, Stockholm

Olsson, M & I Bergqvist (1995). *Sprickutbredning vid flerhålssprängning*, SveBeFo Rapport 18, Stockholm.

Olsson, M & I Bergqvist (1997). *Sprickutbredning vid flerhålssprängning - sammanfattande rapport av försöksperioden 1993-96*, SveBeFo Rapport 32, Stockholm.

Olsson, M & F Ouchterlony (2003) *Ny skadezonsformel för skonsam sprängning*, SveBeFo Rapport 65, Stockholm.

Olsson, M, V Svahn, F Ouchterlony & I Bergqvist (2003). *Fragmentering i bergtäkter*, SveBeFo Rapport 60, Stockholm.

- 
- Ouchterlony, F (1997). *Prediction of crack lengths in rock after cautious blasting with zero inter-hole delay*. SveBeFo Rapport 31.
- Ouchterlony, F, C Sjöberg, S-E Johansson & U Nyberg (1991). *Blasting damage investigation in access ramp 0/526-0/565 m rapport nr 3, Damage zone assessment by vibration measurements*. SKB progress report 25-91-14. SKB, 1991.
- Ouchterlony, F & M Olsson (2000). Dags att komplettera befintlig skadezonstabel? *Bergsprängningskommittén Diskussionsmöte BK 2000*, 155-178, Stockholm
- Ouchterlony, F, M Olsson, S-O Båvik (2000). Perimeter blasting in a 130 m road cut in gneiss with holes with radial bottom slots. *Proc. of the 1<sup>st</sup> world conference on explosives & blasting technique: 225-233*, Balkema, Rotterdam.
- Ronge, B (2000). *Lokalisering av försökstäckter SveBeFo-projekt 636*. Geologiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Sjöberg, C (1979). Sprickutbredningszoner kring smala borrhålsladdningar. *Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte BK-79*, 53-98.
- Vanbrabant, F & A Espinosa (2006). Impact of short delays sequence on fragmentation by means of electronic detonators: theoretical concepts and an field validation. In *Proc FRAGBLAST-8, 8th Int Symp on Rock Fragmentation by Blasting*, 326-331. Editec: Santiago.
- Vägverket (1995). Skonsam sprängning, försiktig sprängning samt bergrensning, bergtekniska anvisningar för projektering av Ringen & Yttre Tvärleden, Projekteringsanvisning ANV 0003:1 Rev. 1. Vägverket Region Stockholm, 1995-09-15. Sid. 18.

## BILAGOR

### Bilaga 1: Referensgruppen i projektet sprängskador från strängemulsion

Björn Petterson	Orica
Jan Kristiansen	Orica
Bengt Niklasson	Skanska nu Geosigma
Magnus Björkman	Skanska
Peter Lundman	Banverket
Rolf Christiansson	SKB
Finn Ouchterlony	Swebrec

### Bilaga 2: Data från salva 1 och 2, försöksomgång 1 (maj 2006)

Data för salva 1								
Hål	1	2	3	4	5	6	7	8 <sup>3</sup>
Hållängd (m)	5,35	5,40	5,40	5,40	5,40	5,45	5,55	5,50
Håldiam. (mm)	48	48	48	48	48	48	48	48
Primer <sup>1</sup>	NP 15	NP 15	NP 15	NP 15	NP 15	NP 15	NP 15	NP 15
EPD-kapsel	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot
Intervalltid (ms)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Sprängämne <sup>2</sup>	Dynotex	Dynotex	Dynotex	Dynotex	SSE	SSE	SSE	SSE
Laddningar (st)	11	11	11	11				
Sträng (kg/m)					0,35	0,35	0,35	0,35
Avladdning (m)	0,2	0,25	0,25	0,2	0	0	0	0
Torrt/Vått	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt
Hålavst. (m)	0,50	0,60	0,65	0,55	0,55	0,55	0,50	0,55
Försättning (m)	0,60	0,60	0,65	0,70	0,70	0,70	0,70	0,80

Not 1: NobelPrime 15x150 mm, 2: Dynotex 17x500 mm, likvärdigt med Gurit 17 mm, 3: VOD-mätning.

#### Kontroll strängladdning 0,35 kg/m

Vikt 2 m plexiglasrör	(kg)	0,740
Vikt 2 m laddat rör	(kg)	1,446
Laddningsvikt	(kg/m)	0,353
Koppdensitet	(kg/dm <sup>3</sup> )	0,9
Dimension ogasad	(mm)	20
Dimension gasad	(mm)	27

**Bilaga 2: Data från salva 1 och 2, försöksomgång 1 (maj 2006) forts**

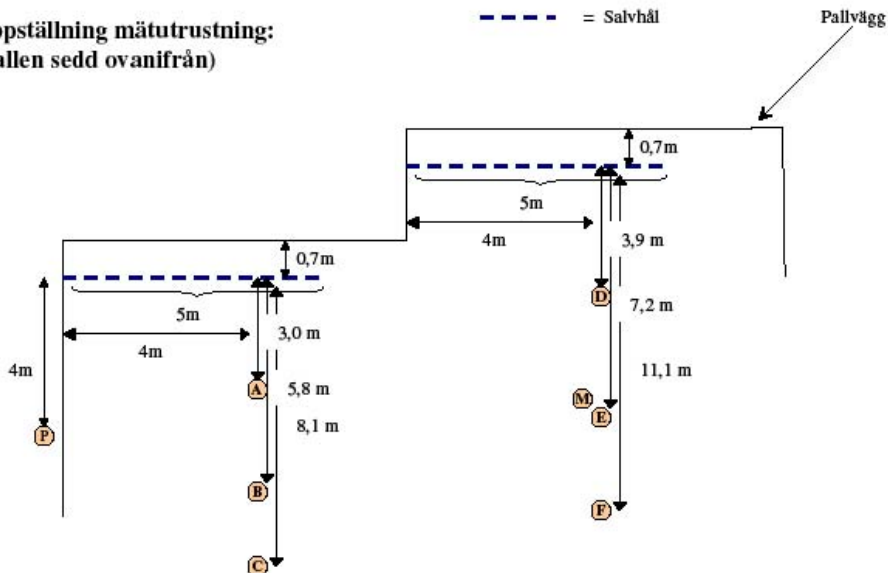
Data för salva 2							
Hål	1	2	3	4	5	6	7
Hållängd (m)	5,35	5,55	5,25	5,15	5,43	5,50	5,47
Håldiam. (mm)	48	48	48	48	48	48	48
Primer <sup>1</sup>	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17
Kapsel	Nonel LP	Nonel LP	Nonel LP	Nonel LP	Nonel LP	Nonel LP	Nonel LP
Intervalltid (ms)	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Sprängämne	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE
Sträng (kg/m)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Avladdning (m)	0	0	0	0	0	0	0
Torrt/Vått	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Vått	Vått	Vått
Hålavstånd (m)	0,40	0,70	0,60	0,80	0,50	0,65	0,60
Försättning (m)	0,70	0,60	0,60	0,65	0,70	0,70	0,75

Not 1: NobelPrime 15x150 mm.

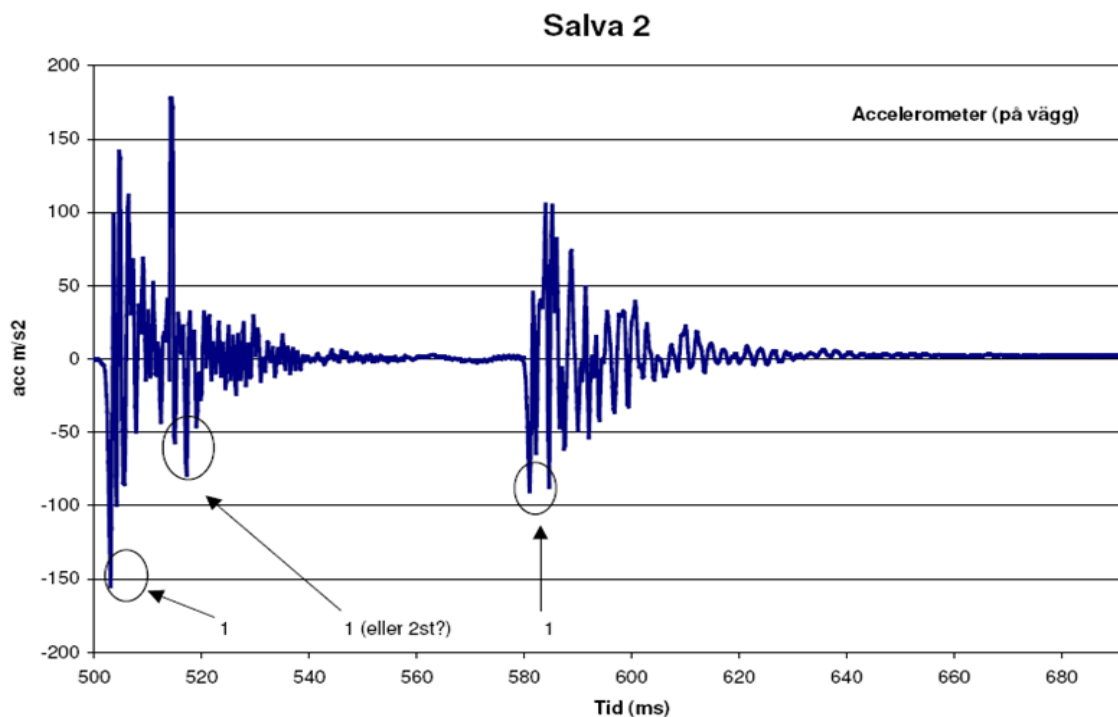
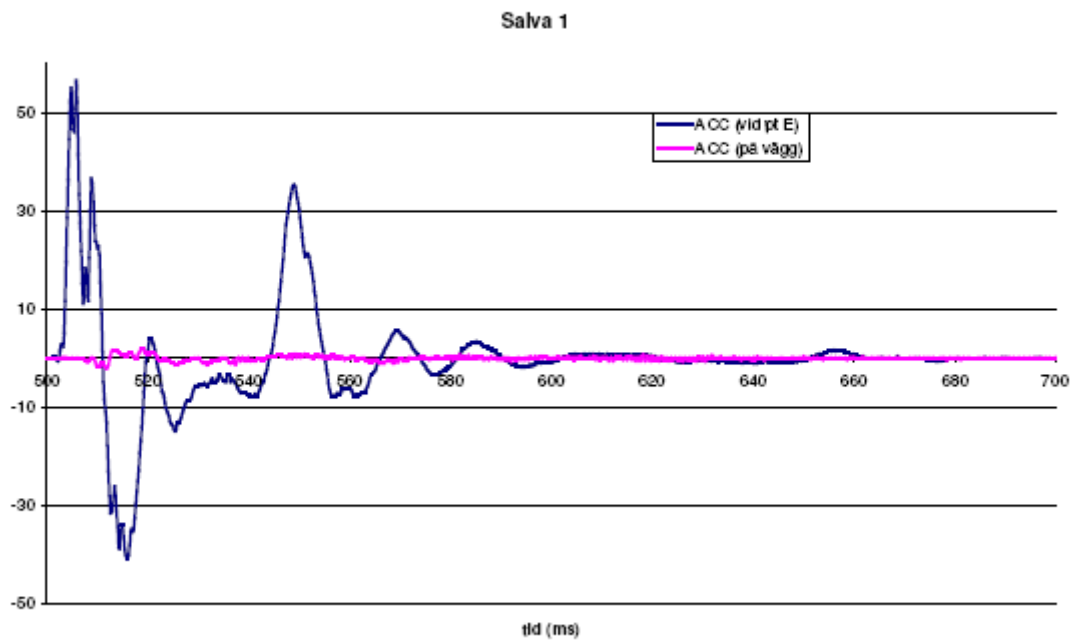
**Bilaga 3: Placering av mätgivare för vibrationsmätningar, försöksomgång 1 (maj 2006)**

A = B = C = Geofoner (V+L)  
 D = E = F = Geofoner (V+L)  
 P = Accelerometer på vägg (i höjdlid mellan hål 4 och 5)  
 M = Accelerometer nära geofon E

Uppställning mätutrustning:  
 (pallen sedd ovanifrån)





**Bilaga 4: Vibrationssignaler, försöksomgång 1 (maj 2006)**

**Bilaga 5: Data från salva A, försöksomgång 2 (juni 2006)**

Data för salva A								
Hål	1	2	3	4	5 <sup>3</sup>	6	7	8
Hållängd (m)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Hållutning	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej
Håldiam (mm)	48	48	48	48	48	48	48	48
Primer <sup>1</sup>	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17
Nonel-kapsel	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55
Intervalltid (ms)	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Sprängämne	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE
Sträng (kg/m)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,5	0,5	0,5	0,5
Avladdning (m)	0	0	0	0	0	0	0	0
Torrt/Vått	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt
Hålavstånd <sup>2</sup> (m)	0,63	0,57	0,72	0,57	0,58	0,58	0,60	0,58
Försättning <sup>2</sup> (m)	0,76	0,71	0,73	0,72	0,67	0,73	0,86	0,69

Not 1: NobelPrime 17x150 mm 2: Inmätt från foton 3: VOD-mätning.

Kontroll strängladdning, 0,35, 0,5 och 0,9 kg/m			
Vikt 2 m plexiglasrör	(kg)	0,743	0,740
Vikt 2 m laddat rör	(kg)	1,753	2,887
Laddningsvikt	(kg/m)	0,51	1,07
Koppdensitet	(kg/dm <sup>3</sup> )	-	-
Dimension ogasad	(mm)	osäkert	osäkert
Dimension gasad	(mm)	osäkert	osäkert

**Bilaga 6: Data från salva B, försöksomgång 2 (juni 2006)**

Data för salva B								
Hål	1	2 <sup>3</sup>	3	4	5	6	7	8
Hållängd (m)	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
Hållutning, nedåt °	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Håldiam. (mm)	48	48	48	48	48	48	48	48
Primer <sup>1</sup>	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17	NP 17
Nonel-kapsel	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55	LP 55
Intervalltid (ms)	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500	5500
Sprängämne	SSE	SSE	SSE	SSE	Kemix <sup>3</sup>	Kemix <sup>3</sup>	Kemix <sup>3</sup>	Kemix <sup>3</sup>
Laddningar (st)	-	-	-	-	3,5	4	4	4
Sträng (kg/m)	0,9	0,9	0,9	0,9	-	-	-	-
Avladdning (m)	0	0	0	0	0,25	0,15	0,10	0,30
Torrt el. Vått	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Vått	Vått	Vått	Vått
Hålavstånd <sup>2</sup> (m)	0,64	0,56	0,61	0,60	0,64	0,51	0,61	0,60
Försättning <sup>2</sup> (m)	0,66	0,74	0,72	0,79	0,72	0,71	0,72	0,76

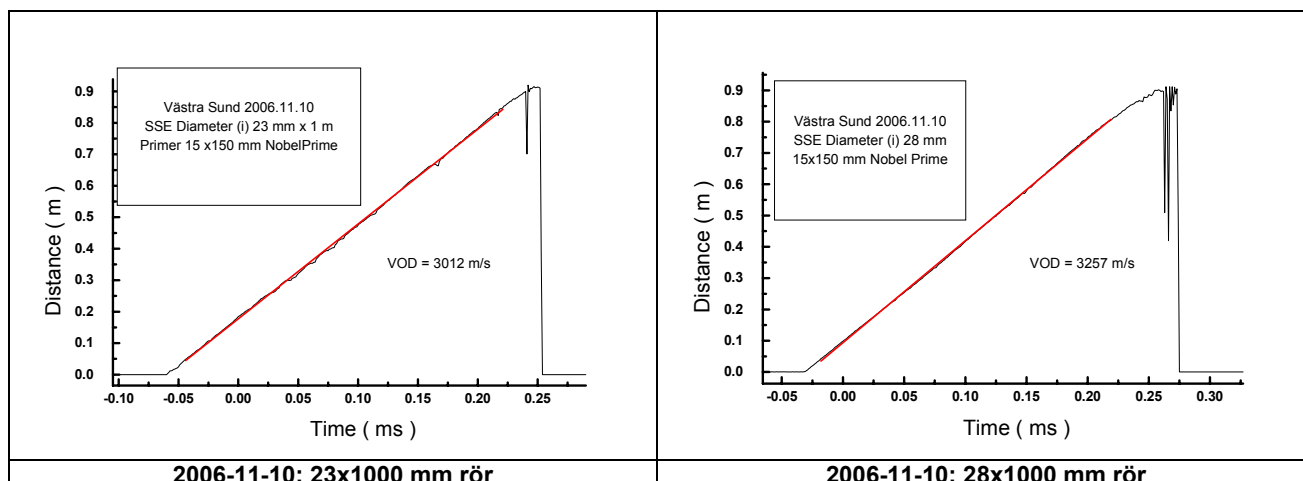
Not 1: NobelPrime 17x150 mm 2: Inmätt från foton 3: VOD-mätning.

**Bilaga 7: Data från salva D, försöksomgång 2 (juni 2006)**

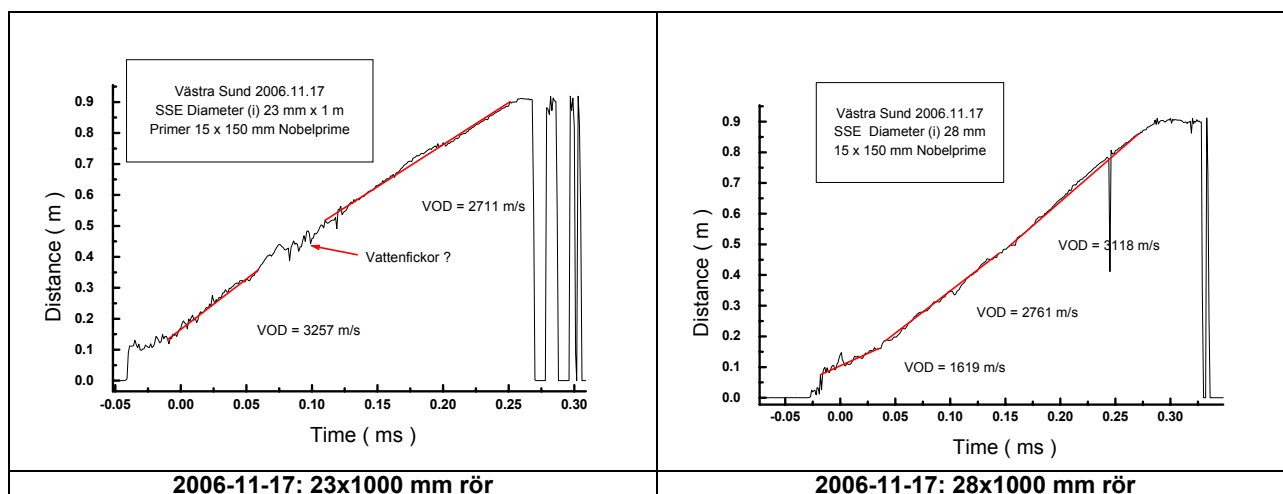
Data för salva D									
Hål	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hållängd (m)	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
Hållutning, upp °	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Håldiam. (mm)	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Primer <sup>1</sup>	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
EPD-kapsel	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot	HotShot
Intervalltid (ms)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Sprängämne <sup>4,5</sup>	SSE	SSE	SSE	Dynotex	Dynotex	Dynotex	Kemix	Kemix	Kemix
Laddningar (st)	-	-	-	9	9	9	4	4	4
Sträng	0,35	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-
Avladdning (m)	0	0	0	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Torrt el. Vått	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt	Torrt
Hålavstånd <sup>2</sup> (m)		0,72	0,70	0,66	0,68	0,64	0,67	0,65	0,60
Försättning <sup>2</sup> (m)	0,70	0,60	0,70	0,72	0,70	0,72	0,80	0,74	0,74

Not 1: NobelPrime 17x150 mm 2: Inmätt från foton 3: Dynotex 17x500 mm 4: Kemix A 17x1000 mm

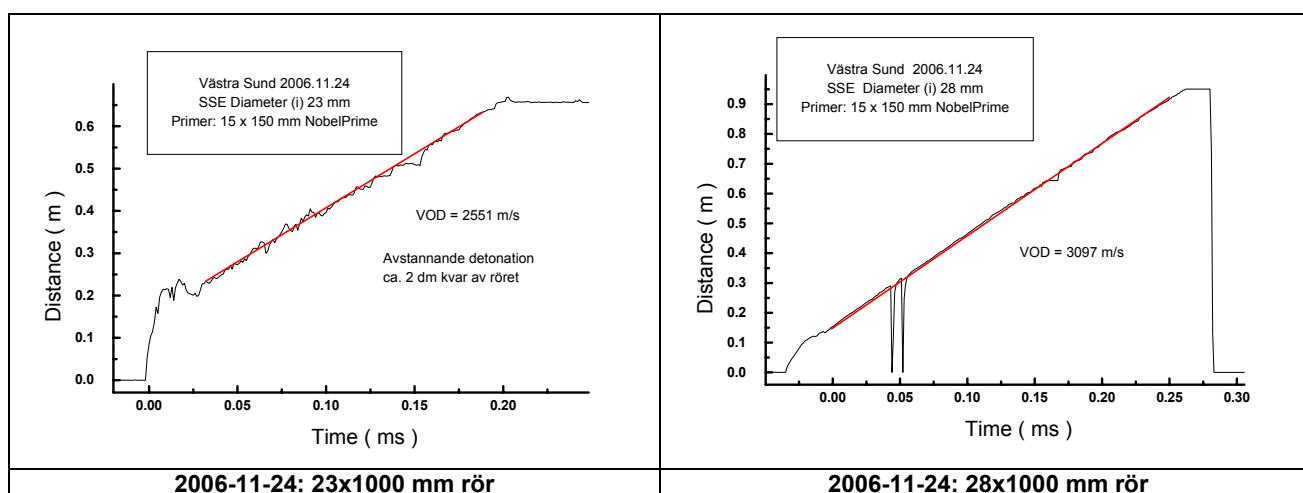
### Bilaga 8: Provsjutning av rör laddade med SSE, dagen efter laddning 2006-11-09



### Bilaga 9: Provsjutning av rör laddade med SSE, 1 vecka efter laddning 2006-11-09



### Bilaga 10: Provsjutning av rör laddade med SSE, 2 veckor efter laddning 2006-11-09



**Bilaga 11: Data från försöksomgång 3 (november 2006), EPD-kapslar i-kon<sup>®</sup>**

Data för försöksomgång 3						
Hål	Hållängd (m)	Primer <sup>1</sup>	Intervalltid (ms)	Sprängämne	Avladdning (m)	Torrt / Vått
1	4,45	NP 15	0	Dynotex 1	0,50	T
2	4,40	NP 15	0	Dynotex 1	0,25	T
3	4,45	NP 15	0	Dynotex 1	0,30	T
4	4,30	NP 15	0	Dynotex 1	0,20	T
5	4,40	NP 15	0	SSE 0,35	0,70	T
6	4,25	NP 15	0	SSE 0,35	0,40	T
7	4,20	NP 15	0	SSE 0,35	0,25	T
8	4,25	NP 15	0	SSE 0,35	0,40	T
9	4,20	NP 15	0	SSE 0,5	0,40	T
10	4,20	NP 15	0	SSE 0,5	0,40	T
11	4,30	NP 15	0	SSE 0,5	0,40	T
12 <sup>2</sup>	4,20	NP 15	0	SSE 0,5	0,40	T
13 <sup>2</sup>	4,30	NP 15	4	SSE 0,35	0,45	T
14	4,30	NP 15	8	SSE 0,35	0,40	T
15	4,40	NP 15	7	SSE 0,35	0,50	T
16	4,40	NP 15	6	SSE 0,35	0,40	T
17	4,50	NP 15	4	SSE 0,5	0,35	T
18	4,50	NP 15	1	SSE 0,5	0,30	T
19	4,50	NP 15	5	SSE 0,5	0,30	T
20	4,60	NP 15	6	SSE 0,5	0,30	T
21	4,70	NP 15	8	SSE 0,5	0,35	V
22 <sup>2</sup>	4,90	NP 15	9	SSE 0,5	0,35	V
23	5,00	NP 15	10	SSE 0,5	-	V

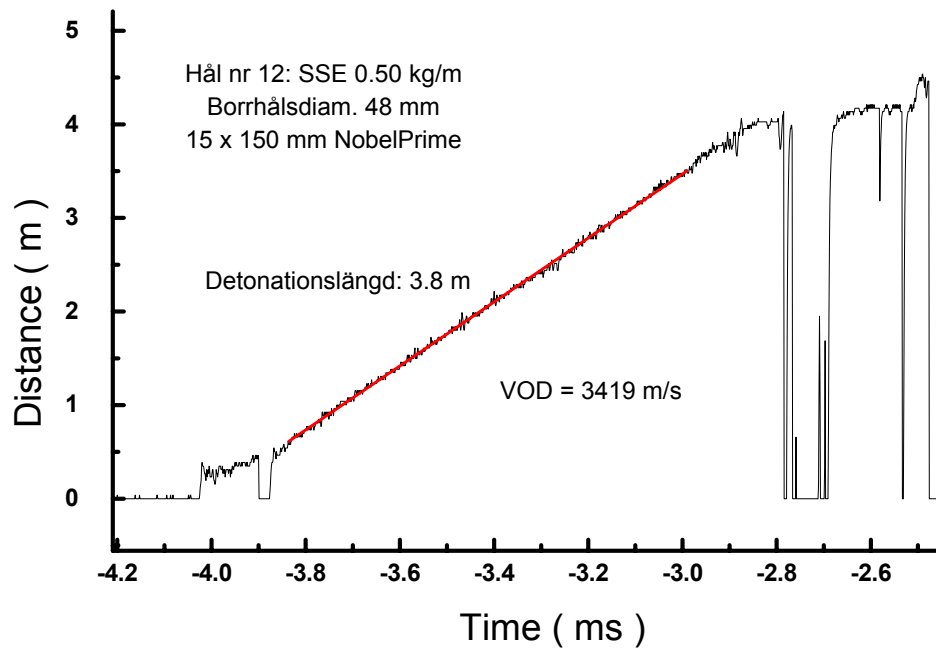
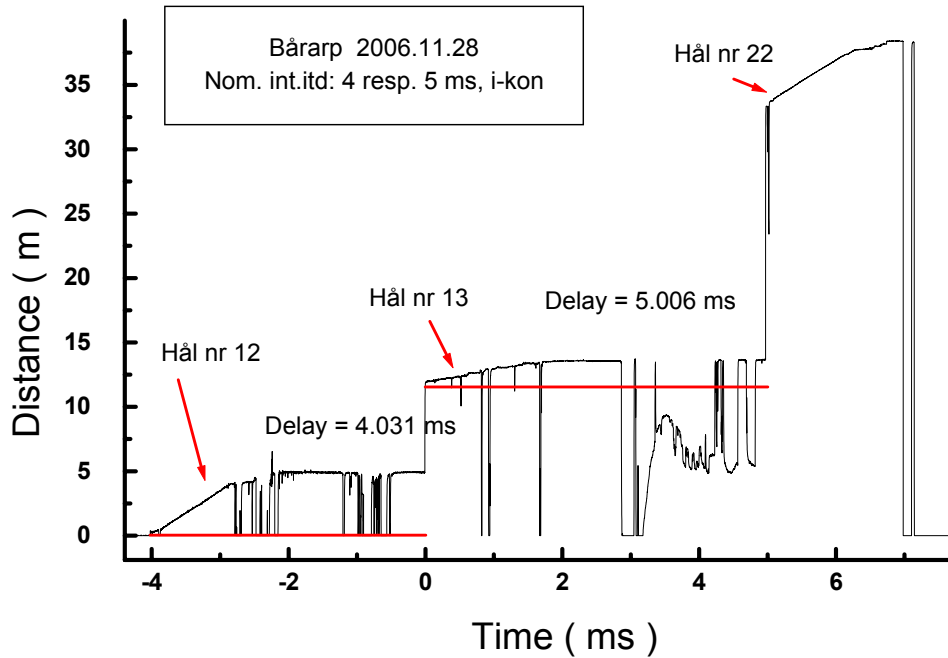
Not 1: NobelPrime 15x150 mm 2: VOD-mätning

Hålavstånd, mätta ur 3D-modell																
Hål	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	15-16	16-17	17-18	20-21	21-22	22-23	
Hålavstånd <sup>2</sup>	0,58	0,49	0,67	0,65	0,55	0,69	0,68	0,63	0,68	0,69	0,86	0,76	1,02	0,97	1,09	

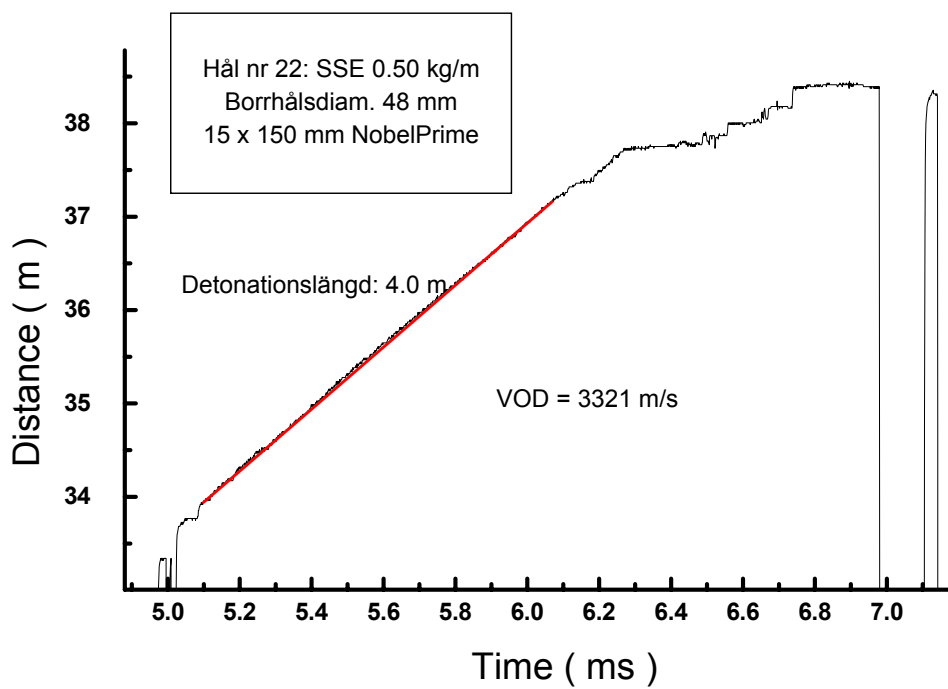
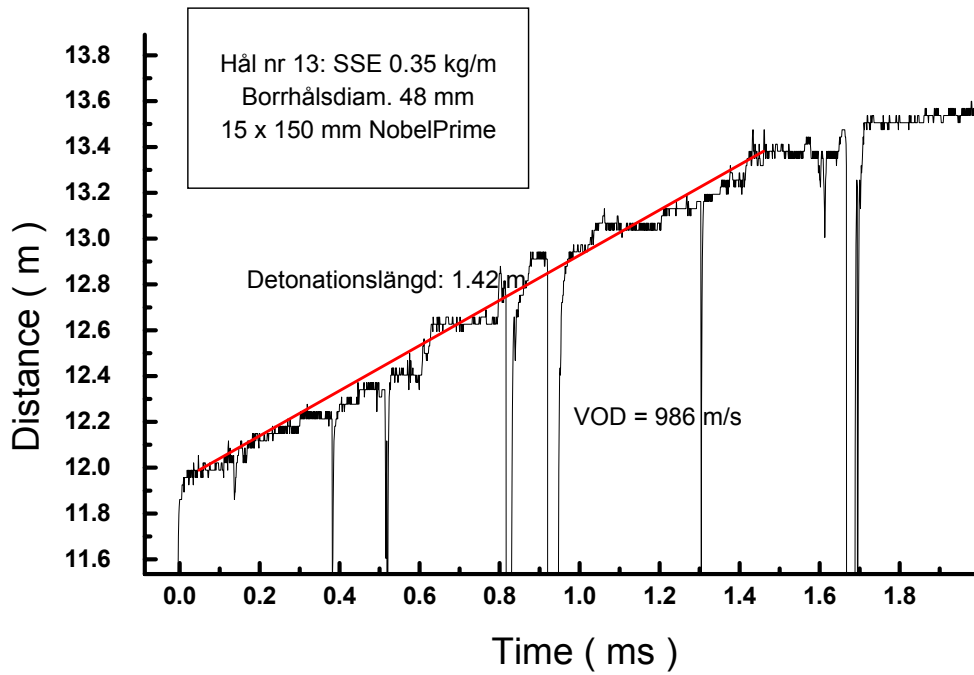


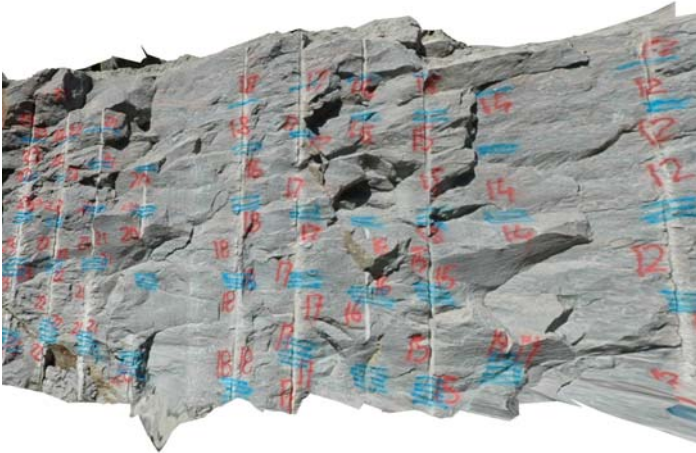
## Bilaga 12: VOD-mätning, försöksomgång 3, 2006-11-28

Instrumenteringen bestod av MREL, modell MiniTrap med Probe Cable, 3,38 ohm/m



## Bilaga 12: VOD-mätning, försöksomgång 3, 2006-11-28, forts



**Bilaga 13: 3D-modell av pallfronten efter skjutning i försöksomgång 3****Hål 13-23, ej simultan initiering****Hål 1-12, simultan initiering**

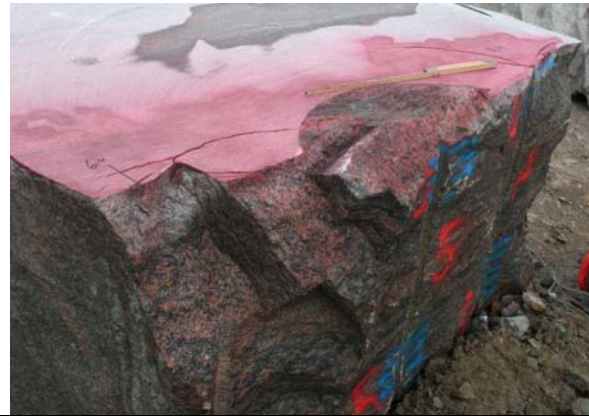
Råheten på berget har beräknats genom att analysera ett antal punkter på bergytan. I dessa punkter kan sedan ytornas orientering bestämmas. Dataprogrammet visar detta genom pilar med olika riktningar och längder från de valda punkterna på bergytan. Den sfäriska aperturen definieras som ”a spread of orientations around the mean value”, alltså ett spridningsvärde på hur bergytorna är orienterade. Medelvärdet är då ytan pekar vinkelrät mot pallytan. Ju högre värdet på aperturen är, desto större är avvikelser från medelvärdet, dvs. ju ojämnare är bergytan. Tabellen ger aperturvärdena.

Råhetsdata för sprängda ytor								
Mellan hål nr	1-12	2-4	5-8	9-12	13-23	13-16	17-20	21-23
Antal mätpunkter	56	13	18	16	85	20	24	18
Sfärisk apertur	16,1	17,4	16,5	15,6	23,0	29,1	18,0	24,9

Ojämnast är bergpartiet mellan hålen 13-16 som skjutits med SSE 0,35 kg/m och Nonel-initiering och där flera halvpipor saknas. De olika bergpartierna mellan hål 1-12 som skjutits samtidigt med EPD-kapslar är jämnast och värden för de enskilda grupperna sprider inte särskilt mycket. Mätt med aperturmåttet är alla bergytorna för de samtidigt skjutna grupper jämnare än de som skjutits med Nonel.

**Bilaga 14: Bilder på fler sågade snitt i Bårarpsbrottet****Hål 1:3-3:3 Dynotex, simultan initiering****Hål 1:3-3:3 Dynotex, simultan initiering****Hål 3:4-1:4 Dynotex, simultan initiering****Hål 3:4-1:4 Dynotex, simultan initiering****Hål 3:4 Dynotex, simultan initiering****Hål 6:3 SSE 0,35 kg/m samt Hål 4:3 Dynotex, simultan initiering**

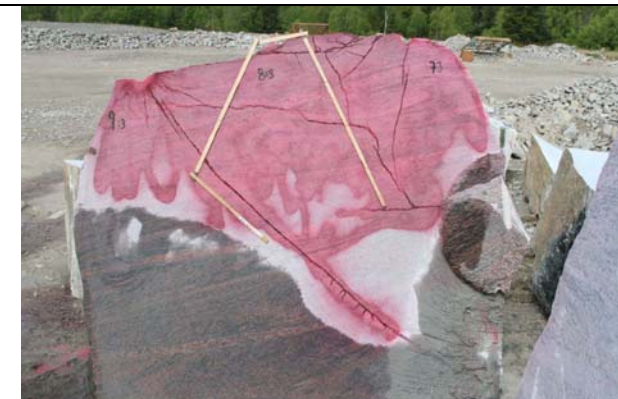


**Bilaga 14: Bilder på fler sågade snitt i Bårarpsbrottet, forts**


Hål 6:4 SSE 0,35 kg/m och hål 4:4 Dynotex, simultan initiering



Hål 4:4 Dynotex, simultan initiering



Hål 9:3 SSE 0,5 kg/m och hål 8:3-7:3 SSE 0,35 kg/m, simultan initiering



Hål 7:4-8:4 SSE 0,35 kg/m och hål 9:4 SSE 0,5 kg/m, simultan initiering

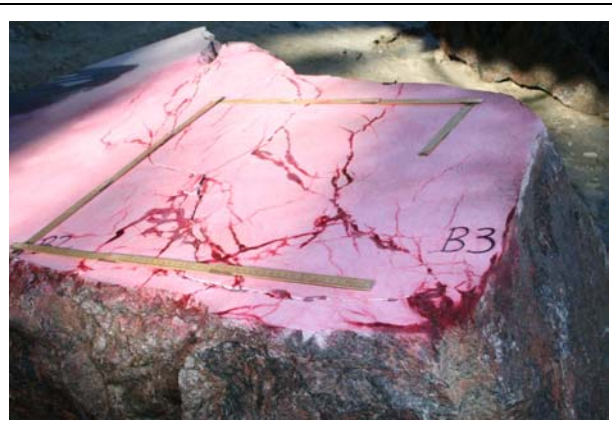
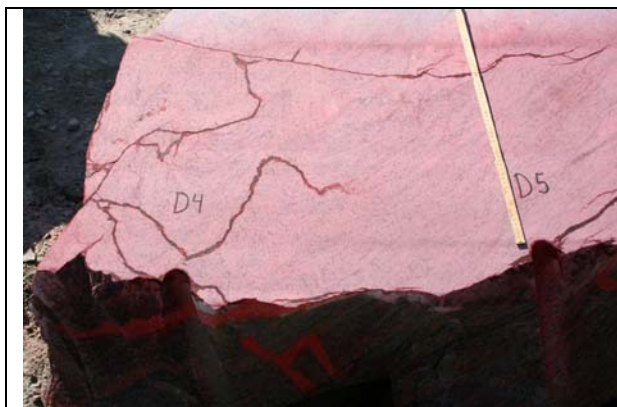
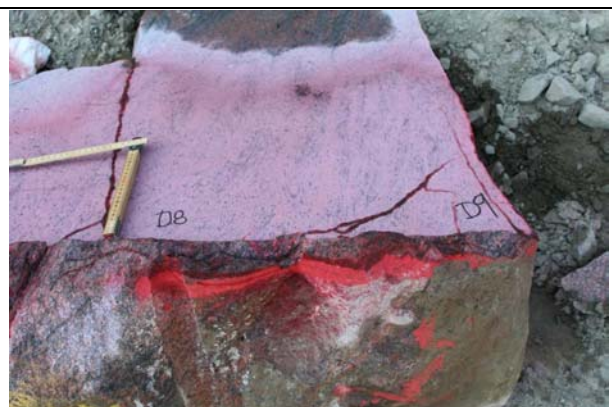


Hål 11:1-9:1 SSE 0,5 kg/m, simultan initiering



SSE 12:1-11:1 SSE 0,5 kg/m, simultan initiering



**Bilaga 14: Bilder på fler sågade snitt i Bårarpsbrottet, forts****Hål A6 SSE 0,5 kg/m, Nonel-initiering****Hål B2-B3 SSE 0,9 kg/m, Nonel-initiering****Hål D4-D5 Dynotex, EPD-initiering****Hål D7 Kemix, EPD-initiering****Hål D7-D8 Kemix, EPD-initiering****Hål D8-D9 Kemix, EPD-initiering**

**Bilaga 15: Ett urval av uppmätta spricklängder i (cm)**

Hål	Mitt-hål	Spräng-ämne	Laddnings-vikt (kg/m)	Initiering	Detonerat	Maximal spricklängd	Radiella sprickor			Krosssprickor			Övrigt	
							Längder	Antal	Medel	Längder	Antal	Medel		
<i>Försöksomgång 2</i>														
A2	Ja	SSE	0,35	Nonel	?	0								Detonerat?
A3	Ja	SSE	0,35	Nonel	?	0								Detonerat?
A6	Ja	SSE	0,5	Nonel	Ja	<b>36</b>	36,21	2	28	4,5,9	3	6		
B1	Nej	SSE	0,9	Nonel	Nej	0								Ej detonerat
B2	Ja	SSE	0,9	Nonel	Ja	<b>50</b>	50,35,30	3	38					
B3	Ja	SSE	0,9	Nonel	Ja	<b>&gt;60</b>	60,12	2	36					
D1	Nej	SSE	0,35	EPD	Ja	>20	>20	3						Hålläge borta
D2	Ja	SSE	0,35	EPD	Ja	<b>55</b>	55,45,22	3	41					
D4	Nej	Dynotex	0,21	EPD	Nej	20	20	1	20	7	1	7		
D5	Ja	Dynotex	0,21	EPD	Ja	<b>30</b>	30	1	30	4	1	4		
D6	Nej	Dynotex	0,21	EPD	Ja	30	30	1	30					
D7	Nej	Kemix A	0,22	EPD	?	15	15	1	15					Odet. laddn.
D8	Ja	Kemix A	0,22	EPD	Ja	<b>18</b>	18,8	2	13	10	1	10		
<i>Försöksomgång 3</i>														
1:3	Nej	Dynotex	0,21	EPD	Ja	40	20,40	2	30					
1:4	Nej	Dynotex	0,21	EPD	Ja	6	6	1	6					
2:3	Ja	Dynotex	0,21	EPD	Ja	<b>11</b>	11	1	11					Båge mot hål 1
2:4	Ja	Dynotex	0,21	EPD	Ja	<b>35</b>	30,5,5,5,3 5	4	16					Båge mot hål 1
3:3	Ja	Dynotex	0,21	EPD	Ja	<b>0</b>								Båge mot hål 3
3:4	Ja	Dynotex	0,21	EPD	Ja	<b>16</b>	5,6,16	3	9					
4:3	Nej	Dynotex	0,21	EPD	Ja	22	22	1	22					
4:4	Nej	Dynotex	0,21	EPD	Ja	18	18	1	18					
6:3	Ja	SSE <sup>a</sup>	0,37	EPD	?	<b>9</b>	9	1	9					
7:3	Ja	SSE	0,32-0,34	EPD	Ja	<b>20</b>	20	1	20					
7:4	Ja	SSE	0,32-0,34	EPD	Ja	<b>20</b>	20,12,20	3	17					

Not a: I försöksomgång 3 laddades SSE manuellt i rör därför sprider vikten något mellan rören.

**Bilaga 15: Ett urval av uppmätta spricklängder i (cm) forts**

Hål	Mitt-hål	Spräng-ämne	Laddnings-vikt (kg/m)	Initiering	Detonerat	Maximal spricklängd	Radiella sprickor			Krosssprickor			Övrigt	
							Längder	Antal	Medel	Längder	Antal	Medel		
<i>Försöksomgång 3, forts,</i>														
8:3	Nej	SSE <sup>a</sup>	0,37	EPD	Ja	10	10	1	10					
8:4	Nej	SSE	0,37	EPD	Ja	0								Båge
9:1	Nej	SSE	0,51	EPD	Ja	18	15,18	2	17	7	>>10	7		Kanthål
9:3	Nej	SSE	0,51	EPD	Ja	30	12,12,13, 15,20,20, 27,30	8	19	7	>>10	7		
9:4	Nej	SSE	0,53	EPD	Ja	80	12,12,25, 30,32,50, 60,60,60, 68,80,80	12	47	10	>>10	10		
10:1	Ja	SSE	0,49	EPD	Ja	<b>32</b>	15,15,15, 15,15,32	6	18	10	>>10	10		
11:1	Ja	SSE	0,50	EPD	Ja	<b>20</b>	11,11,12, 12,12,15, 15,15,20	9	14	10	>>10	10		
12:1	Nej	SSE	0,48	EPD	Ja	40	13,16,23, 19,20,40	6	22	10	>>10	10		
15:5		SSE	0,35	Ej mom.	Ja	5	5	1	5					
16:5		SSE	0,35	Ej mom.	Nej									

*Not a: I försöksomgång 3 laddades SSE manuellt i rör därför sprider vikten något mellan rören*

## Bilaga 16: Bakgrundsformler för beräkning av skadezonsdjup

Formlerna ger bakgrunden till beskrivningen i SveBeFo rapport 65 (Olsson & Ouchterlony 2003).

AnläggningsAMA 98 (1999) förskriver att man tar hänsyn till faktorer som frikoppling, vatten i borrhålet, bergets egenskaper, typ av upptändning, laddningslängd och verklig krondiameter. Det föreslås göras med följande formel för sprickdjupet i konturen, dvs. skadezonsdjupet

$$R_c = R_{c0} \cdot F_h \cdot F_t \cdot F_v \cdot F_b \quad (A1)$$

Här är  $R_{c0}$  är en okorrigerad spricklängd och  $F_h$  etc. är korrektionsfaktorer för hålavstånd (h), tändspridning (t), våta hål (v) samt bergtyp och sprickighet hos bergmassan (b). Grundformlerna, ekvationerna A2a-b och A3a-b, lyder (Ouchterlony 1997)

$$R_{c0} = 0,5 \cdot \Theta_h \cdot (p_{h\text{ål}}/p_{\text{krit}})^{e'} \quad \text{där borrhålstrycket } p_{h\text{ål}} = n(\gamma) \rho_e D^2 \cdot f^{2,2} \quad (A2a-b)$$

med sprängämnetts densitet  $\rho_e$  (kg/m<sup>3</sup>), dess VOD  $D$ (m/s) och kopplingsgraden  $f = (\Theta_e/\Theta_h)$  där  $\Theta_e$  och  $\Theta_h$  är laddnings- respektive håldiametern. Faktorn  $n(\gamma)$  beror på sprängämnetts egenskaper. Det kritiska borrhålstrycket  $p_{\text{krit}}$  och exponenten  $e'$  ges av

$$p_{\text{krit}} = 3,3 \cdot K_{\text{Ic}} / \sqrt{\Theta_h} \quad \text{och } e' = 2/[3(D/c)^{0,25} - 1]. \quad (A3a-b)$$

Här är  $K_{\text{Ic}}$  (Pa<sup>1/2</sup>/m) brottsegheten och  $c$  (m/s) ljudhastighet hos bergmaterialet.

Bakom formelerna som ger  $R_{c0}$  ligger praktiska studier av följande effekter:

1. Tre olika laddningstyper, låg VOD (2000 m/s) sprängämne som Gurit (nu Dynotex 1), emulsions-sprängämne med högre VOD (4800 m/s) som Kimulux 42 och pentylstubin (VOD = 6500-7000 m/s).
2. De vanligaste håldimensionerna,  $\Theta$  51 och 64 mm.
3. De vanligaste laddningsdiametrarna,  $\Theta$  17 och 22 mm.
4. Normal kopplingsgrad för skonsam sprängning,  $f = 0,33-0,45$ .
5. Svenskt urberg; granit i Vånga, Svenneby och Hallinden samt gnejs i Södertälje.

Då  $e' \approx 1,5$  för Gurit och låg-VOD sprängämnen samt  $e' \approx 1,0$  för hög-VOD sprängämnen som Kimulux och pentylstubin blir ekvation 1 tyvärr olika för olika sprängämnen. En korrektionsfaktor för vatten i hål kommer då också att bero på  $e'$ . Formler med ett konstant  $e'$ -värde krävs i princip för att ekvation A1 skall vara hanterbar.

Ekvationerna A2-3 togs fram under det kraftigt förenklande antagandet att VOD för ett sprängämne är en konstant. I praktiken beror VOD-värdet av såväl håldiameter som inneslutning. Det underlättar om ett referenstillstånd väljs, t.ex. det där det finns flest data och relatera förändringarna till detta.

En omräkning baserad på fler spricklängdsdata ger  $e' = 1,525$  i ekvation A2a. I stället måste hänsyn tas till i) att en impedansfaktor införts, ii) en verklig diametereffektkurva VOD( $\Theta$ ) för sprängämnen utom

pentylstubin och iii) att  $\gamma = 3,4$  valts för Kimulux. Det senare reflekterar att  $\gamma \approx 3$  eller större vid CJ-planet. Borrhålsttrycket ges nu av

$$p_{\text{hål}} = n(\gamma) \cdot i(D) \cdot \rho_e D^2 \cdot f^{1,835} \text{ och impedansfaktorn av } i = [(\rho_b c_b / \rho_e D)]^{0,333}. \quad (\text{A4a-b})$$

Här betyder index b storheter för berget. Kritiskt borrhålsttryck beräknas som i ekvation A3a med faktorn 10,8 i stället för 3,3. Överensstämmelsen mellan försöksdata och de nya formlerna ligger inom  $\pm 15\%$ , se Tabell A-1. Passningen till data har också blivit bättre i och med att  $r^2$  ökat från 0,953 till 0,997.

**Tabell A-1: Den ny beräkningsformelns överensstämmelse med data**

Sprängämne	Gurit	Gurit	Gurit	Gurit	Emulet 20	Kimulux	Dex 80
Laddning, mm	17	22	22	22	51	22	9
Håldiameter, mm	51	51	64	24	51	64	64
VOD, gamla	2000	2000	2000	2000	1850	4800	6500
VOD, ny	2165	2549	2549	3000	1770	4547	6500
Mätt $R_c$ , m	0,101	0,325	0,232	0,912	0,376	0,332	0,182
Beräknad $R_c$ , m	0,107	0,307	0,243	0,920	0,339	0,380	0,161
Skillnad, %	6,3	-5,7	4,6	0,9	-9,7	14,4	-11,7

Relativt referenstillståndet gäller sen för alla sprängämnen

$$R_c = R_{\text{ref}} \cdot (f/f_{\text{ref}})^{2,8} \cdot (\Theta_h/\Theta_{h,\text{ref}})^{1,75} \cdot (D/D_{\text{ref}})^{2,55}. \quad (\text{A5})$$

Ekvationen tar alltså hänsyn till diametereffekten hos VOD. Omräkning till laddningskoncentration  $q$  (kg/m) med  $q \propto \Theta_e^2 = f^2 \cdot \Theta_h^2$  ger så

$$R_c = R_{\text{ref}} \cdot (f/0,34)^{1,05} \cdot (q/0,38)^{0,88} \cdot (D/D_{\text{ref}})^{2,55} \text{ för sprängämnen typ Dynotex 1,} \quad (\text{A6a})$$

$$R_c = R_{\text{ref}} \cdot (f/0,34)^{1,05} \cdot (q/0,42)^{0,88} \cdot (D/D_{\text{ref}})^{2,55} \text{ för sprängämnen typ Kimulux,} \quad (\text{A6b})$$

$$R_c = R_{\text{ref}} \cdot (f/0,14)^{1,05} \cdot (q/0,08)^{0,88} \text{ för sprängämnen typ Detonex.} \quad (\text{A6c})$$

Som referenstillstånd gäller  $R_{\text{ref}} = 0,20$  respektive  $0,30$  m för 22 mm frikopplad Dynotex 1 och Kimulux i 64 mm hål med  $S/B = 0,8-1,0$  i svenskt urberg. För Detonex gäller  $R_{\text{ref}} = 15$  cm för 80 g/m i 51 mm hål. Till ekvationerna A6a-c hör diametereffektkurvor för laddningar i torra hål, med  $\Theta_e$  given i mm

$$D = D_{\text{torr}} = 3850-1300 \cdot (22/\Theta_e) \text{ m/s för typ Dynotex 1, dvs. } D_{\text{ref}} = 2550 \text{ m/s,} \quad (\text{A7a})$$

$$D = D_{\text{torr}} = 5300-750 \cdot (22/\Theta_e) \text{ m/s för typ Kimulux, dvs. } D_{\text{ref}} = 4550 \text{ m/s,} \quad (\text{A7b})$$

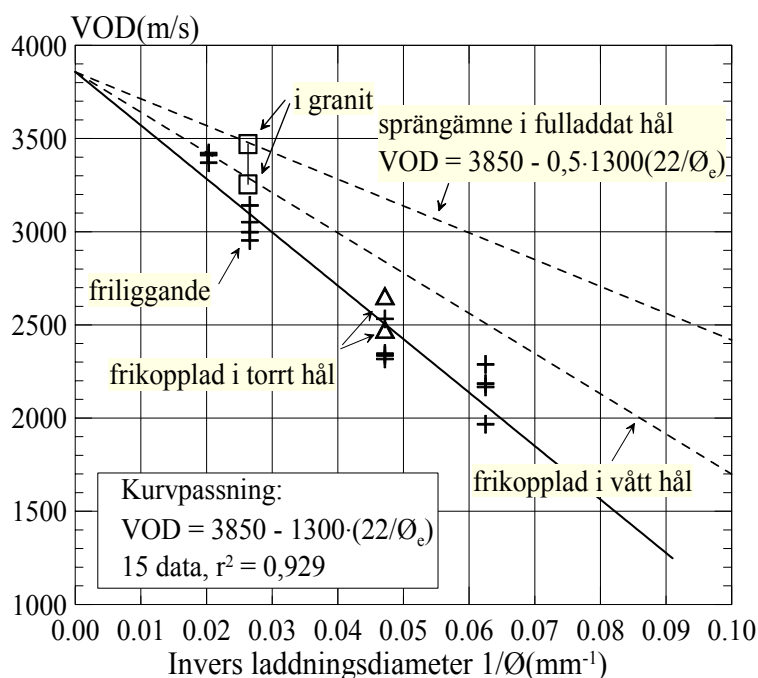
$$D = D_{\text{torr}} = D_{\text{ref}} = 6500 \text{ m/s för typ Detonex.} \quad (\text{A7c})$$

För våta hål har vi antagit att vatteninneslutningen kring rörladdningen ger hälften så stor ökning av VOD jämfört med friliggande laddning som fulladdat hål i berg ger, dvs. i grova drag skall faktorerna 1300 och 750 i ekvation A7a-b reduceras med 25 % så att

$$D_{\text{våt}} = 3850 - 975 \cdot (22/\varnothing_e) \text{ m/s för typ Dynotex 1 och} \quad (\text{A8a})$$

$$D_{\text{våt}} = 5300 - 560 \cdot (22/\varnothing_e) \text{ m/s för typ Kimulux.} \quad (\text{A8b})$$

För typ Detonex gäller  $D_{\text{våt}} = D_{\text{torr}} = 6500 \text{ m/s}$ , dvs ingen inverkan alls av vattnet. Figur A1 visar dataunderlag för typ sprängämne typ Dynotex 1. metodiken gör att andra sprängämnestyper kan inarbetas i formelunderlaget om deras egenskaper är tillräckligt kända.



Figur A-1: Detonationshastighetsdata för Gurit (nuvarande Dynotex 1)

Data från försök och litteratur tyder på att en lämplig form för korrektionsfaktor för våta hål är

$$F_v = (D_{\text{våt}}/D_{\text{torr}})^{2,55} / f^{0,75}. \quad (\text{A9})$$

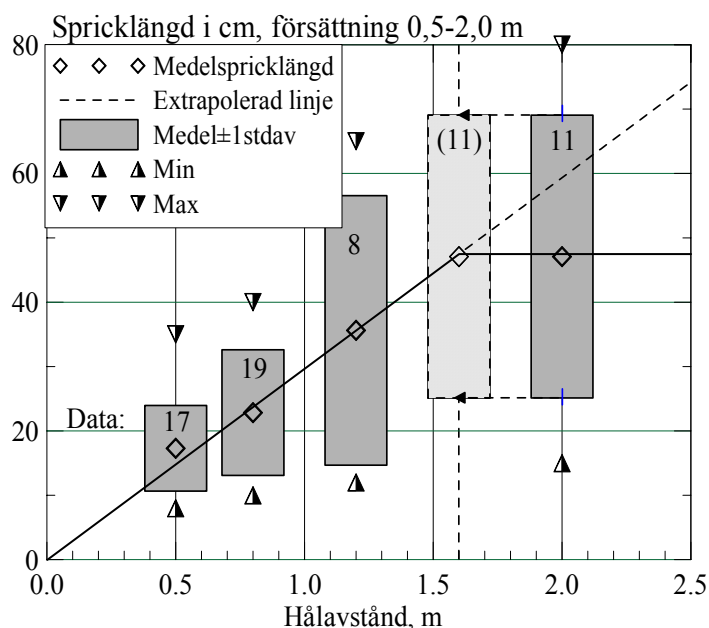
När laddningsdiametern går mot håldiametern,  $\varnothing_e \rightarrow \varnothing_h$ , gäller  $f \rightarrow 1$  och  $D_{\text{våt}} = D_{\text{torr}}$ . Då går korrektionsfaktorn  $F_v \rightarrow 1$ , vilket är fysikaliskt riktigt.

Som exempel tar vi vattnets inverkan för referenstillståndet. Då erhålls  $F_v = 3,0$  för typ Dynotex 1, 2,5 för typ Kimulux och 4,4 för typ Detonex. Skadeökningen från vatten i konturhål kan alltså vara betydande. Det är till och med så att skadezonen från en klenare laddning i ett vått hål (22 mm typ Kimulux i 64 mm



vått hål) mycket väl kan djupare än skadezonen från nästa storlek på laddning i ett torrt hål (29 mm Kimmulux i 64 mm torrt hål).

Faktorerna  $F_h$  och  $F_t$  är hopkopplade. Hålavståndet  $S$  spelar ingen eller liten roll för skadezonsdjupet vid pyroteknisk upptändning men väl vid simultan. Då ändras det inte heller nämnvärt vid ökad försättning. Figur A2 visar hur spricklängden eller skadezonsdjupet ändras med hålavståndet. Den ökar med  $S$  tills  $S \approx 2B$  (försättningen) varefter den är konstant och ungefär dubbelt så stor som när  $S \approx B$  vid vanlig kontursprängning. Detta stöder våra tidigare observationer att skadezonsdjupet vid pyroteknisk upptändning är ungefär dubbelt så stort som vid simultan upptändning av hålen (Olsson & Bergqvist 1997), åtminstone för normala värden på  $S$  och  $B$ , dvs.  $S > B$  och  $B = 0,5-0,8$  m.



**Figur A-2: Spricklängd i kvarstående berg för frikopplad Dynotex 1 (Ø22 mm Gurit i 64 mm hål) som funktion av hålavstånd vid simultan upptändning**

Den samverkan vid simultan upptändning som ger en reduktion av skadezonsdjupet är sannolikt relaterad till stötvågen från grannhålen eftersom samverkan uteblir vid så liten fördröjning som 1 ms. Pyroteknisk upptändning har en spridning på minst  $\pm 6$  ms, oftast betydligt mer. Samverkan inträffar då bara undantagsvis.

Ett annat sätt att minska samverkan är att öka hålavståndet. Så småningom upphör den och skadezonsdjupet blir samma som för enstaka hål eller för pyroteknisk upptändning. Samverkan upphör sannolikt när  $S > 2B$ . Då kommer den reflekterade stötvågen från den fria ytan fortare tillbaka till ett språnghål än stötvågen från grannhålet. Den reflekterade vågen ger troligen ett försteg åt de sprickor som kommer att definiera konturen och undertrycker de som riktas in i berget.

Linjen i Figur A2 antyder att den skadereducerande effekten av simultan upptändning skulle öka ju närmare konturhålen kommer varandra. Det har vi inget fullständigt belägg för. Med en konservativ

bedömning bör vi följaktligen kunna skriva den kombinerade korrektionsfaktorn för hålavstånd och upptändning vid simultan upptändning som

$$F_h \cdot F_t = 1 \text{ om } S/B \leq 1,$$

$$F_h \cdot F_t = S/B \text{ om } 1 < S/B \leq 2 \text{ och} \tag{A10a}$$

$$F_h \cdot F_t = 2 \text{ om } S/B > 2.$$

Så länge som upptändningen sker väl inom 1 ms så gäller den både för elektronisprängkapslar och för pentylstubin. För pyroteknisk upptändning gäller hela tiden

$$F_h \cdot F_t = 2. \tag{A10b}$$

Vi har gjort följande observationer för sprickor i samband med kontursprängning

- Sannolikheten för en spränginducerad radiell spricka att korsa en befintlig spricka som är ovittrad och ingrepp är ca 1/3.
- Sprickor som når längre än halva avståndet till närmsta blockgräns tenderar att förlängas fram till blockgränsen. Avståndet kan kopplas till medelsprickavståndet.
- Sprickrosor bakom halvpipor som är kortare än halva hålavståndet,  $R_c < S/2$ , samverkar inte och isolerade sprickrosor är inte farliga för stabiliteten.

Informationen har emellertid inte räckt för att göra en meningsfull korrektionsfaktor  $F_b$  för bergets egenskaper.