

## SveBeFo Rapport 56

### FÖRORD

Sedan mitten av nittiotalet har en serie delprojekt genomförts hos SveBeFo för att undersöka effekter av luftstöt vågor från sprängning och möjligheter att begränsa dem. Särskilt vid arbeten i tätort har det varit viktigt att minimera påverkan på omgivningen, både bullerstörningar och risk för skador på fönsterrutor eller andra känsliga byggnadsdelar. De första undersökningarna genomfördes av Lena Reidarman i samband med utsprängning av den s k Räddningscentralen i centrala Stockholm, där dämpande effekt av barriärkonstruktioner prövades. Därefter gjordes försök i den nedlagda Dannemora gruva, som kunde användas som försöksplats för kontrollerade försök, och även i Kirunagruvan, där syftet var att pröva möjligheten att dämpa stöt vågen vid källan, dvs. att arrangera sprängsalvans laddningar så att luftstöt vågen skulle begränsas. Mätningarna gjordes i anslutning till andra pågående forskningsarbeten kring uppsprickning och skadezoner vid ortdrivning.

Dessa undersökningar som gjordes i fullskala, dels med enstaka hål eller grupper av hål, dels i hela salvor visade på möjligheter att hantera problemet, men resultaten var svåra att tolka helt entydigt, bland annat på grund av svårigheter att isolera olika inverkan faktorer i aktuella geometrier. Undersökningarna finns avrapporterade i SveBeFo:s rapporter K5, S5 och K13. Erfarenheterna av dessa försök ledde till ett förslag, redovisat i rapport K 13, att mer renodlat pröva effekter av förladdning i enstaka hål i mindre skala och under väl definierade geometriska förhållanden. En serie sådana försök har nu genomförts i ett stenbrott i Bohuslän och avrapporteras i föreliggande rapport. Sedan Lena Reidarman lämnat SveBeFo har fältarbete, datainsamling, analys och rapportering huvudsakligen gjorts av Ulf Nyberg, SveBeFo, med Rickard Forsén från Tyréns som projektledare, och med en mindre referensgrupp där Gösta Rundqvist, Nitro Consult, Bo Karlsson, Vägverket, Bengt Niklasson, Skanska Teknik, och Göran Svedbjörk, Sycon Teknikkonsult, deltagit. Arbetet har också redovisats vid Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte 2002 under rubriken ”Luftstöt vågor som ett miljöproblem”.

I och med denna rapport, som visar på goda möjligheter att reducera luftstöt vågen genom lämpligt arrangerad förladdning, finns för närvarande inga planer på något fortsättningsprojekt inom området. Vi vill därmed framföra ett tack till dem som aktivt medverkat i de olika projekten och i tillhörande referensgrupper.

Stockholm i oktober 2002

Tomas Franzén

## SAMMANFATTNING

Det har blivit allt viktigare att minska den luftburna stötvågen från sprängsalvor som innebär störningar i form av buller, och i enstaka fall kan skada fönster och andra känsliga byggnadsdelar. Störningar för boende förekommer särskilt vid sprängning inom tätort.

Efter några tidigare undersökningar har SveBeFo i detta delprojekt under två perioder mätt övertrycket i närheten (ca 10-30 m) av detonerande enkelladdningar. Mätningarna genomfördes i ett blockstensbrott för bohusgranit; Hallindens granit AB norr om Uddevalla under perioderna den 23/2-3/3 och den 25-28/6 under 2001.

På grund av att uppmätta signaler från tidigare fullskaliga fältförsök varit svårtolkade har vi i detta projekt gjort en ansats att renodla fältmätningarna för att hitta detaljerade samband mellan karakteristiska tryck och uppsprickningsförlopp i berget samt effekterna av varierande förladdningslängder. De aktuella förloppen kan beskrivas som starka berggrörelser eller förflyttning av berg, svaga berggrörelser eller vibration, utströmmande förbränningsprodukter genom spränghålet samt förbränningsprodukter som strömmar ut genom sprickor.

Sprängningarna omfattade först 5 stycken försök med Dynamex. Förhållandet mellan laddningsvikten och bergets utsprängda volym hölls konstant. Spränghålen var 0,5–2,0 m djupa med en håldiameter på 38 mm och laddade från botten. Förladdningarna var av torrt fingrus (2-4 mm). Dessutom genomfördes 5 stycken försök med friliggande laddningar för att få jämförelsedata. Sammanlagt 6 mätpunkter användes. Övriga och svårtolkade sprängningsresultat från första försöksomgången fick oss att inför andra omgången istället utgå från konstanta laddningsvikter och varierande spränghålsdjup. Laddningar på ca 460 gram av Dynamex, Gurit och sprängdeg laddades från botten i 0,5–1,5 m djupa 38 mm hål. Utav 13 stycken laddningar var 4 stycken friliggande. Förladdningarna var av samma typ som för den första försöksomgången.

Resultaten visade att trycken och impulstätheterna (integralvärdet av övertrycket) sjunker dramatiskt när förladdningen är effektiv. Det ena extremfallet är när gruspluggen står kvar efter sprängningen och tryckvågsstörningarna är i nivå med mätsystemets brusnivå, det andra är när gruspluggen tryckts ut, berget är kraftigt sprucket och trycken från detonerande friliggande respektive fördämda laddningar är approximativt lika.

I rapporten försöker vi att koppla uppsprickningsförloppen till mätresultaten. Resultaten verifierar att tryckvågorna kan reduceras avsevärt genom effektiva förladdningar av 2-4 mm fingrus, att de högsta trycken orsakas när förladdningen trycks ut och att mycket låga tryckamplituder genererar av svaga berggrörelser. Resultaten tyder på att tryckvågorna kan ha en låg nivå trots kraftig sprickbildning kring spränghålen. Utifrån

detta rekommenderas effektiva förladdningar med tillräcklig längd; speciellt vid sprängningsarbeten inom tätort.

## SUMMARY

It is becoming increasingly important to reduce the shock waves from blasting that cause noise and sometimes damage on buildings. Especially in urban areas blasting may cause problems.

After some earlier investigations SveBeFo have in this project during two periods done measurements on airblast overpressure 10-30 m from single detonating charges. The measurements were carried out in a stone quarry for Bohus granite; Hallinden granite AB north of Uddevalla, Sweden, during the periods 23/2-3/3 and 25-28/6, 2001.

Based on the interpretation of signals from earlier full scale blasting, a project was initiated for well-controlled shock wave generation and measurement, aimed to find a relation between air blast generation and characteristics over pressure pulses and the effect of varying stemming length. The source of pressure wave generation may be described as, strong rock surface movement, limited surface movement or vibrations, stemming ejection and blowouts from fractures.

The first 5 blasts were made with the explosive type Dynamex. The relation of the explosive weight (60-3175 g) and the blasted rock volume were planned to be constant. The blast holes depth was 0.5- 2.0 m and a diameter of 38 mm, charged from the bottom with stemming of 2-4 mm gravel. For comparison 5 blasts were made with unconfined explosives. All together 6 pressure gauges were used. Due to unexpected results from the first test series the second test series was made with the explosives Dynamex, Gurit and explosive paste, all of approximately 460 g. The blast holes were 0.5-1.5 m deep and the same diameter as in the first test. Altogether 13 charges were used, 4 of them unconfined. The stemming was of the same type as in the previous test.

The results show that the pressure and integrated pressure reduces strongly when the stemming is efficient. One extreme case is when the stemming is still in its primary position after blast and the air blast overpressure is very low. The other extreme is for stemming ejection, the rock surface is fractured and the overpressure has approximately the same value as for the unconfined explosives.

The report shows an attempt to relate a single detonating blast hole to pressure data. The results verify that air blast overpressure may be strongly reduced by using effective stemming of gravel 2-4 mm, that the highest air blast overpressure is generated by stemming release and that rock motion only, generates very low air blast overpressure. The test indicates that the air blast overpressure may be very low despite strongly fractured rock. Based on the results we recommend extra effort to find good stemming quality and the correct stemming length, especially for blasting in urban areas.

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>VAL AV FÖRSÖKSPLATS .....</b>	<b>2</b>
2.1	FÖRSÖKSPLATS ETT .....	3
2.2	FÖRSÖKSPLATS TVÅ .....	4
2.3	SKILLNADER MELLAN PLATSERNA .....	5
<b>3</b>	<b>LADNING OCH INITIERING .....</b>	<b>5</b>
3.1	FÖRSÖKSPLATS ETT .....	6
3.2	FÖRSÖKSPLATS TVÅ .....	7
<b>4</b>	<b>MÄTNING AV TRYCKVÅGOR.....</b>	<b>9</b>
4.1	DEFINITIONER AV TRYCK .....	10
4.2	TRYCKGIVARE FÖR FÖRSÖKSPLATS ETT .....	10
4.3	TRYCKGIVARE FÖR FÖRSÖKSPLATS TVÅ .....	12
4.4	TEMPERATURINVERSION SOM ORSAK TILL FÖRSTÄRKTA TRYCKVÅGOR .....	12
<b>5</b>	<b>RESULTAT .....</b>	<b>12</b>
5.1	TRYCK OCH IMPULSTÄTHET FÖR FÖRSÖKSPLATS ETT .....	14
5.1.1	<i>Uppsprickningsförlopp och karakteristiska tryck</i> .....	17
5.2	TRYCK OCH IMPULSTÄTHET FÖR FÖRSÖKSPLATS TVÅ .....	18
5.2.1	<i>Tre uppsprickningsförlopp samt karakteristiska tryckvågor</i> .....	19
<b>6</b>	<b>SLUTSATSER .....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>ERKÄNNANDE.....</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>APPENDIX.....</b>	<b>30</b>
9.1	UTRUSTNING FÖR MÄTNING OCH ANALYS .....	30
9.2	UPPHÄNGNING AV TRYCKMÄTARE .....	31
9.3	UTPLACERING AV TRYCKMÄTARE .....	32
9.4	EXEMPEL PÅ SIGNALER FRÅN FÖRSTA FÖRSÖKSOMGÅNGEN .....	32
9.5	EXEMPEL PÅ SIGNAL FRÅN ANDRA FÖRSÖKSOMGÅNGEN .....	34

## 1 INLEDNING

Denna rapport kommer att behandla uppmätta tryckvågor i luft från detonerande enkelladdningar i luft respektive fördämda i borrhål. Fältmätningarna har utförts ovan jord i ett blockstensbrott i Bohuslän; närmare bestämt Hallindens granit AB ca 40 km norr om Uddevalla under perioderna 23/2 –3/3 och den 25-28/6 under 2001. Mätningarna har kunnat genomföras tack vare hjälp från blockstensbrottets ägare.

Rapporten är resultatet av fortsättningen på tre tidigare delprojekt, vars övergripande mål varit *att kunna utforma en sprängning så att riskerna minimeras för skador från luftstöt vågor på omkringliggande byggnader och boende*. I det andra av delprojekten som genomfördes i en utbildningsgruva vid nedlagda Dannemora gruvor i Uppland (Reidarman, 1997), undersöktes dämpning dels vid källan genom förladdning av spränghålen, dels med hjälp av en barriärkonstruktion. Man fann bland annat att en barriärkonstruktion som täckte ca 90 % av ortarean dämpade tryckvågen ca 50 % mer än en konstruktion med ca 40 % täckning. Det tredje av dessa projekt som genomfördes i Kirunagruvan gällde tryckmätningar från hela underjordssalvor. Man hade då vissa svårigheter att utvärdera mätningarna, vilket resulterade i planering av ett antal förenklade och väl definierade mätningar av lufttrycksvågor från enskotts försök ovan jord. Den föreliggande rapporten gäller just dessa försök.

Boenden kring byggarbetsplatser upplever ibland byggandet störande. Speciellt inom tätbebyggda områden ställs krav från allmänheten på hänsyn till omgivande miljö. En undersökning utgiven av Vägverket (Rohman, 2001) visar att kringboende stördes vid byggandet av Södra Länken. Det är också känt att bebyggelsen kring en byggarbetsplats kan ta skada av bergvibrationer och lufttrycksvariationer i samband med sprängningar, se t ex (Rundqvist, 1998).

*I det aktuella arbetet har vi för det första försökt att renodla tidigare fältförsök så att minsta möjliga tvivel råder vid utvärderingen och för det andra att försöka hitta samband mellan karakteristiska tryck och uppsprickningsförlopp samt att se effekterna av varierande förladdningslängder.*

Uppmätta tryckfaser har definierats som karakteristiska delar av mätsignalen enligt (Wiss & Linehan, 1978) och (Siskind m. fl., 1980); Air Pressure Puls (APP) som uppkommer vid en stark berg rörelse eller förflyttning av bergets yta, Rock Pressure Puls (RPP) som genereras av en svag rörelse eller vibration i bergets yta, Stemming Release Puls (SRP) som uppkommer av utströmmande förbränningsprodukter genom spränghålet och Gas Release Puls (GRP) som är mest oförutsägbar och uppkomma när gasen strömmar ut genom sprickor eller sprickzoner.

Uppsprickningsförloppen kring spränghål har beskrivits i detalj av Persson m.fl., (1994). Senare studier av detonerande sprängämne och tryck- tid förlopp i spränghål har genomförts av Nie, (2000), stöt vågor från sprängning vid ortdrivning av Nyberg m.fl., (2000), kvarstående sprickbildning av Olsson (1997) och mätningar med hjälp av radar av fria ytans hastighet vid pallsprängning av Felice (1992). Uppsprickningsförloppets

senare del, när förbränningsprodukter strömmar ut i sprickor och ut ur spränghålet, är sannolikt det mest intressanta för uppkomsten av lufttrycksvågor.

För den första försöksperioden har för 5 stycken försök, förhållandet  $Q/V$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) för Dynamex d v s laddningsvikten genom bergets utsprängda volym hållits konstant. Spränghålen var 0,5–2,0 m djupa med en håldiameter på 38 mm och laddade från botten. Förladdningarna var av torrt fingrus (2-4 mm). För att få jämförelsedata har dessutom 5 stycken försök gjorts med friliggande laddningar. Tryckvågor har mätts upp i två riktningar i sammanlagt 6 mätpunkter, accelerationen har mätts upp i tre mätpunkter på bergets yta och sprängresultaten har fotograferats efter varje avslutat försök.

Analysen av försöksperiod ett gav flera oväntade resultat. Bland annat sprack och fragmenterades berget på ett sätt som omöjliggjorde meningsfulla beräkningar av utsprängda bergvolym. Vi utgick istället inför den andra försöksperiod konstanta laddningsvikter  $Q$  (kg) och varierat spränghålens djup  $H$  (m). Enkelladdningar på ca 460 gram av Dynamex, Gurit och sprängdeg laddades från botten i 0,5 – 1,5 m djupa 38 mm:s hål. Utav 13 stycken laddningar var 4 stycken friliggande. Förladdningarna var av samma typ som för den första försöksomgången.

Kapitel 2 beskriver kort de två försöksplatserna. I kapitel 3 beskriver vi laddningen och initieringen av spränghålen samt en enkel metod för uppskattning av tryckvågsamplituderna beroende olika laddningsdjup. Själva mätningen, definitioner av tryck samt de använda instrumenten diskuteras i kapitel 4. Avsnitt 4.4 tar upp begreppet temperaturinversion som en allmän kommentar. I kapitel 5 visas resultaten från de två försöksomgångarna. Avsnitten innehåller exempel från sprängningar av ett hål i taget med olika grader av utstötningsbrott i markytan. Mätdata presenteras på två sätt; som tryckmaximum mot skalat avstånd, och som integrerade tryck- tidsförlopp mot skalat avstånd. Mätresultaten sätts i samband med sprängresultaten. Kapitel 6 innehåller slutsatser. Appendix kapitel 9 visar bl. a. exempel på tryckmätningar och integrerade tryckmätningar (Impulstäthet). En analys av impulser och impulstider är relevant, speciellt vid undersökning av skaderisker för byggnader. Detta låg dock utanför detta delprojekts ramar.

## 2 VAL AV FÖRSÖKSPLATS

Tre platsalternativ diskuterades. Nordkalk på Gotland med Siluriska (395 – 435 milj. år) lerskiffrar och kalkstenar, Ludden, Skanskas granitbrott i närheten av Norrköping samt granitområden nära Norra Bohuslänns kust. De Siluriska bergarterna är sedimentära och har naturliga svaghetsplan. Graniterna i Ludden sprängs vanligen utan hänsyn till kvarstående skador i pallväggarna. Bohusgraniten bedömdes därför mest lämplig i och med att den är relativt oskadad och sprickfri.

Sprängningarna i Hallinden har alltså genomförts inom ett urbergområde bestående av Bohusgraniter, (Lundegård m. fl., 1978). Området är relativt ungt rubidium-

strontiumdaterat till 910 miljoner år och består av en sur, massformig granit med vissa karakteristiska drag; runda stora blottade hållar. Många bergformer har uppkommit på grund av de slag som går i stort sett vinkelrätt mot varandra. Speciellt viktigt för stenindustrin är de vågräta bottenlagen som bildar naturliga pallar. Den aktuella Bohusgraniten är röd och används till gravvårdar, byggnader och utsmyckning.

Respektive fältmätningarna har utförts under två perioder under helt olika väderförhållanden. Den första mätperioden dominerades av kallt och torrt vinterväder, den senare av varmt och torrt sommarväder.

## 2.1 Försöksplats ett

Platsen karakteriseras av en vertikal ca 5 meter hög försöksvägg med horisontellt borrarade spränghål på väggens undre del (Figur 2-1). Framför väggen, fanns en öppen



**Figur 2-1** Granitväggen, försöksplats ett, med fyra spränghål  $\phi 38$  mm som från vänster räknat har djupen 1,5 m, 1,0 m 2,0 m och 0,5 m.

markyta, som avgränsades i spränghålens riktning på ca 40-50 m avstånd av större utplacerade block någon meter höga. Spränghålen var riktade i en av mätriktningarna. Markytan rakt ut från den vertikala väggen fram till blocken, bestod av en i stort sett jämn frusen yta med finkornigt material som vid mättillfället var täckt av 5-10 cm snö. Längs med den vertikala väggen, fanns en del nedfallna block. De lösa jordlagren under markytan bestod enligt uppgifter (Lundgren, 2001) överst av ca 0,5 m finkornigt material, ca 0,5 m grövre material därunder samt ca 5 m block i botten.



## 2.2 Försöksplats två

Som den första sprängplatsen, består också denna av en röd Bohusgranit. Avståndet mellan de två platserna understiger 1 km. Några begränsningar i form av block på markytan eller dylikt fanns inte. Spränghålen var till skillnad från försöken vid den första platsen borrhade vertikalt från bergets övre yta. Denna var helt blottad (Figur 2-2) över mätområdet som mätte ca 50 m i mätriktningen (mätning endast i en riktning) och 15-20 m till en kant mot stenbrottet. På motstående sida om stenbrottet fanns ett glest skogsparti.



**Figur 2-2** Bergets yta för försöksplats två med tre stycken tryckgivare på stöd. Laddningarna var placerade i närheten av en tänkt kameraposition för den aktuella bilden.

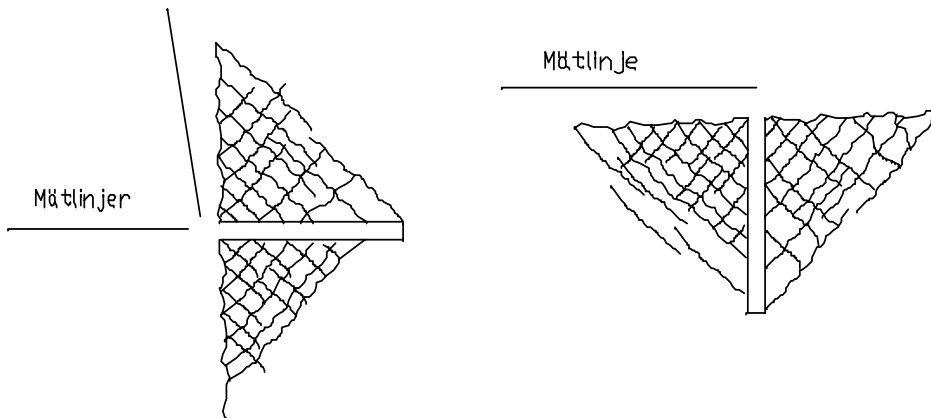
### 2.3 Skillnader mellan platserna

Platserna skiljer sig åt på följande punkter.

- Spränghålens riktning i förhållande till mätriktningarna (Figur 2-3).
- Geometri: (Avsnitt 2.1 och 2.2)

Horisontellt snitt  
Första försöksomgången

Vertikalt snitt  
Andra försöksomgången



**Figur 2-3** Till vänster finns ett horisontellt spränghål ( $\phi$  38 mm) i en vertikal vägg med två stycken mätlinjer. Till höger finns ett vertikalt spränghål ( $\phi$  38 mm) i en horisontell yta med en mätlinje vinkelrät mot spränghålens riktning. Vinkeln mellan profilerna till vänster är 80- 90°.

### 3 LADDNING OCH INITIERING

Försöken påbörjades med ett antal laddningar i fria luften. Dessa tjänade som referensladdningar och placerades framför den vertikala väggen respektive ute på de öppna mätplanerna (avsnitten 2.1 och 2.2). De friliggande och fördämda sprängningarna planerades enligt Tabellerna 3-1 och 3-2.

Initieringen av laddningarna har skett med vanliga elektriska engrams tändkapslar med pyrotekniska fördröjningssatser (Produktkatalogen Dyno Nobel, 1995). Registrering av initieringstiden har ordnats med hjälp av så kallade kortslutningsgivare; en enkel kabel (koaxialkabel av typen RG174) har placerats inne i sprängämnet för detektering.

Alla försöken har genomförts med enkelladdningar. Varje fördämd laddning har laddats från botten, lätt packad tillsammans med tändaren och kabeln så att sprängämnet varit i kontakt med hålväggen. Ovanpå sprängämnet har fingrus 2-4 (mm) jordartsterm enligt Lundegård m. fl. (1978) fyllts till bergets yta. Fingruset var förpackat i tunt papper format som patroner. Varje ny instoppad patron pressades något mot hålets botten med

en laddstav. Alla spränghålen har borrats med  $\phi 38$  mm. Inbördes avstånd mellan hålen valdes med tanke på att kratrarna inte skulle påverka de närliggande och kommande sprängförsöken.

### 3.1 Försöksplats ett

En viktig förutsättning var att renodla fältförsöken. Projektgruppen bedömde att  $Q/V$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) dvs laddningsvikten genom bergets utsprängda volym skulle hållas konstant för olika håldjup genom att utgå från en konformad utsprängd volym med 45 graders konvinkel. Volymen  $V$  av en rak cirkulär kon med basradien lika med höjden  $h$  kan skrivas  $V = \pi h^3/3$ . Tabell 3-1 visar en försöksmatris som utgår från detta. Det använda sprängämnet var Dynamex och har enligt produktkatalogen, Nitro Nobel 1994,

- Densitet:  $1400 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Energi:  $4,5 \text{ MJ}/\text{kg}$
- Gasvolym:  $890 \text{ l}/\text{kg}$
- Viktstyrka relativt  $D_x$ : 100 %
- Detonationshastighet (VOD):  $5000 \text{ m}/\text{s}$
- Vattenresistens: Mycket bra

**Tabell 3-1** Planeringsmatris för första försöksomgången med Dynamex.

Förladdningarna är av torrt fingrus (2-4 mm). Sprängämnet har initierats från hålets botten med hjälp av eltändkapslar av standardtyp (1 gram från Dyno Nobel). Laddning nr. 1-3 var fritt upphängda 2-3 dm ut från väggen på ca 0,5 meters höjd, nr. 4 var friliggande på mätplanen, nr. 6 upphängd ca 1,5 m till höger om referenspunkten.

Konstanten  $Q/V$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) var ca 0,45 för mätning 8-11 respektive 0,38 för mätning 12.

Mätning Nr.	Håldjup $H$ (m)	Sprängämne av hålvolum (%)	Förladdning av hålvolum (%)	Vikt $Q$ (g)	Utsprängd volym berg $V$ ( $\text{m}^3$ )	$Q/V$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
1,2,3	0	0	Fri.	95	0	0
4	0	0	Fri.	190	0	0
6	0	0	Fri.	95	0	0
8,9	0,5	8	92	60	0,131	0,46
10	1,0	29	71	460	1,047	0,44
11	1,5	63	37	1500	3,353	0,45
12	2,0	100	0	3175	8,377	0,38

### 3.2 Försöksplats två

Den preliminära utvärderingen av första mätomgångens sprängförsök med Dynamex visade på två oväntade resultat. För det första spräcktes och fragmenterades delar av försöksväggen på ett sätt som omöjliggjorde senare beräkningar av utsprängda bergvolymen. För det andra så skiljde sig inte de uppmätta trycknivåerna från fördämda laddningar jämfört med friliggande nämnvärt åt. De uppmätta tryckvågorna hade också en typisk form (Appendix, exempel på signaler från första försöksomgången) som skiljde sig en del från andra typiska former från litteraturen med ett exponentiellt tryckavtagande.

För att försöka förklara första omgångens mätningar bättre användes vid andra mätomgången förutom Dynamex, två andra typer av sprängämnen. Dessa var sprängdeg (PETN, militärt) och Gurit.

PETN har förhållandevis stabila detonationsegenskaper och relativt hög detonationshastighet, VOD. Gurit har låg VOD och lågt detonationstryck och förväntas därför skada berget minimalt. Detta utnyttjas i praktiken, vid t ex vid försiktig kontursprängning. sprängdegen och Guriten har följande specifikationer.

Pentylsprängdeg: Typ NSP71 från Nexplo Bofors,

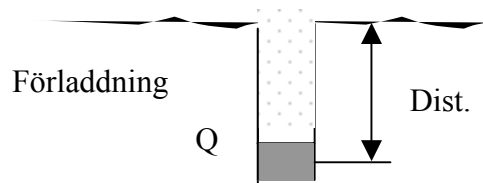
- Densitet  $\rho_{NSP71}$ : 1500 kg/m<sup>3</sup> (NSP71)
- Energi för 100 % PETN: 6,12 MJ/kg (P-A Persson m. fl., 1994)
- Gasvolym 100 % PETN: 780 l/kg (P-A Persson m. fl., 1994)
- Viktstyrka relativt Dynamex: ca 125 %
- Detonationshastighet (VOD):  $VOD = 1,608 + 3,933 \cdot \rho_{pentyl} = 5986$  m/s (PETN) (Gibbs & Popolato, 1980)
- Vattenresistens: Olöslig

Gurit: Enligt produktkatalogen, Nitro Nobel 1994,

- Densitet: 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Energi: 3,4 MJ/kg
- Gasvolym: 930 l/kg
- Viktstyrka rel. Dynamex: ca 80 %
- Detonationshastighet (VOD): 2000 m/s mätt på 17 mm rör
- Vattenresistens: Mindre bra

Analysen av första mätomgången resulterade i att laddningsvikten Q för de tre undersökta sprängämnena hölls konstant under andra mätomgången. Vi lämnade alltså förutsättningen att hålla Q/V (kg/m<sup>3</sup>) konstant. I stället utgick vi från "Scaled Depth of Burial, SD," vilket kan användas vid uppskattning av fragmentering och stenkast vid pallsprängning (Chiappetta, 1998). För långa laddningar gäller approximationen att volymen av en reducerad laddning Q är ekvivalent med den volym som upptas av hållängden 10 gånger borrhålsdiametern.

Vikten  $Q$  beräknas alltså för en begränsad del av totala sprängämnesvikten som ligger övre delen av ett laddat spränghål.



**Figur 3-1** Princip för våra försök vid beräkning av SD, ”Scaled Depth of burial”, för fragmentering, kast och lufttryckvågor.

I våra försök (Figur 3-1) rymmer en laddning mycket mindre än hållängden 10 borrhålsdiametrar och vi har därför använt det verkliga totala  $Q$  – värdet. Funktionen  $SD$  ( $Dist$ ,  $Q$ ) definieras som  $SD = Dist./Q^{1/3}$  med sträckan  $Dist$ . som avståndet mellan bergets yta och laddningens centrum. Spränghålens djup och förladdningarna varierades enligt tabell 3-2.

Beräknade  $SD$ -värden har använts vid försöksplaneringen för att kunna variera luftstötstågornas amplituder. Vid en pallsprängning med  $0 < SD < 0,6$  räknar man med utsprängda kratrar och maximala tryckstågsamplituder och kast. För höga  $SD$ -värden ( $1,85 < SD < 2,40$ ) räknar man endast med svaga störningar på bergets yta och uteblivna kratrar. Lufttryckstågorna blir följaktligen svaga för höga  $SD$ -värden. Aktuella  $SD_{Hallinden}$  – värden finns i Tabell 3-2.

Andra försöksgången gick bland annat ut på att:

1. Försöka förklara första försöksomgångens resultaten bättre genom att jämföra andra sprängämnen med sprängämnet Dynamex.
2. Att utifrån beräknade  $SD_{Hallinden}$ -värden försöka särskilja Air Pressure Puls (APP) och Rock Pressure Puls (RPP) från Stemming Release Puls (SRP) och Gas Release Puls (GRP) genom att variera förladdningen.
3. Filma för att se när och om försättningspluggen tryckts ut.

Tabellen nedan visar en planeringsmatris för sprängämnet och spränghålen. Tryckmätarna var placerade på ca 10-40 m:s avstånd från laddningarna mätt utmed markplanet.

**Tabell 3-2** Planeringsmatris för försöksplats två med laddningsvikter av sprängdeg, Dynamex och Gurit i 38 mm spränghål. Förladdningarna var av torrt fingrus 2-4 mm. Notera att sprängämnen upptar olika volymer beroende av densiteten vilket varierar SD – värdena något. Förutom de tabellerade mätningarna 1-8 gjordes 4 stycken försök med friliggande laddningar i kontakt med bergets yta (Tabell 5-2).

Mätning	Håldjup (m)	Sprängämne 460 (g)	Dist. (m)	Förladdning (m)	SD(Dist,Q)
1	1,0	Sprängdeg	0,85	0,7	1,10
2	1,5	Sprängdeg	1,35	1,23	1,73
3	0,5	Dx	0,35	0,23	0,46
4	1,0	Dx	0,85	0,71	1,10
5	1,5	Dx	1,35	1,20	1,74
6	0,5	Gu	0,30	0,10	0,38
7	1,0	Gu	0,80	0,60	1,00
8	1,5	Gu	1,30	1,10	1,68

#### 4 MÄTNING AV TRYCKVÅGOR

Som framgick av tidigare kapitel har mätningarna genomförts under två olika tidsperioder och vid två skilda mätplatser. Första försöksomgången analyserades före igångsättning av andra omgången, vilket resulterade i en reducerad mätupställning och ett annorlunda genomförande av den senare mätomgången.

Under första försöksomgången användes olika typer av tryckgivare och förstärkare som var separat kopplade på skilda mätsystem. Detta skulle säkerställa mätningarna, så att systematiska fel kunde upptäckas. Tryckgivarna var anpassade för olika tryckområden och med hänsyn till detta placerade på lämpliga avstånd. För andra försöksomgången användes endast en typ av tryckmätare. Definitioner av tryck, tryckmätare och dess funktioner diskuteras i avsnitten nedan.

Under första försöksomgången användes två centralenheter. Dessa var dels en DAT – bandspelare (16 kanaler, DC-20 kHz och 16 bitars inspelning) och dels ett oscilloskop (500 MHz och 8 bitar). Alla mätkablar var koaxialkablar av typen RG 58. För DAT-bandspelaren gällde att mätsignalerna spelades in med en så kallad samplingshastighet av 48 kS/sek med upplösningen  $\Delta t = 2,083 \cdot 10^{-5}$  s. Oscilloskopet ställdes in på olika mät hastigheter beroende på mätsituationen. Dock aldrig långsammare än vad som gällde för DAT – bandspelaren. På grund av tekniska problem med bandspelaren under första omgången användes endast oscilloskopet under andra mätomgången. Se även Appendix utrustning för mätning och analys.

#### 4.1 Definitioner av tryck

De trycksignaler som registreras beror till viss del på tryckgivarnas form och hur de har monterats. Enkelt uttryckt; om en givare är strömlinjeformad så att tryckvågans utbredning inte påverkas, talar man om ett ostört tryck. Sitter tryckmätaren i stället i t ex en stel vägg med tryckmembranet parallellt med stötvågsfronten, mäter man ett reflektionstryck. Exempel på trycksignaler visas i Appendix.

Definitioner av tryck enligt Eriksson, (C2:1991).

##### Ostört tryck

Trycket  $P_s$  är det hydrostatiska trycket vid ostörd våg d v s mätanordningen påverkar tryckvågen minimalt. Denna tryckmätare visas i Figur 4-1 A.

##### Stört tryck

Totaltrycken  $P_{tot}$  får en överlagrad reflektionstopp, en kort tryckstegring på grund av reflektion mot tryckmätarens frontyta. När den reflekterande ytan är liten, svänger trycket på delar av en millisekund (kort avstånd till avlastande kant) in mot totaltrycket. För låga tryck är  $P_{tot} \approx P_s$ .

#### 4.2 Tryckgivare för försöksplats ett

Tryck- tid- förloppen har mätts upp med de tre typerna av tryckmätare i Figur 4-1 nedan. Utmed varje mätlinje satt tre stycken givare d v s en av varje typ i figuren nedan. Närmast på ca 12 m avstånd har vi använt spjutformade tryckmätare som mäter det så kallade ostörda trycket. På ca 20 m användes en typ av mätrör för det totala trycket (ca 40 mm reflektionsyta). På 30 m användes mikrofoner.

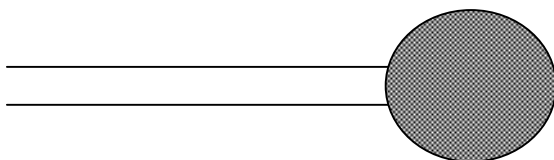
A) Två stycken spjut med PCB 137A23 på ca 12 meters avstånd.



B) Två stycken rör med PCB 106B50 på ca 20 meters avstånd.



C) Två stycken mikrofoner för ljudmätning på ca 30 meters avstånd.



**Figur 4-1** Tre typer av mätutrustning visas. Tryckmätarelementen för spjutet och röret är markerade med svart. Tryckmätare A) var fast monterad på en stolpe nerslagen i marken, B och C) stod på ett stöd på en platta vilande på mineralullskivor på markytan. Observera att en tryckvåg antas komma rakt in från höger i figuren.

Tabell 4-1 nedan visar tekniska specifikationer för tryckgivarna.

**Tabell 4-1:** Använda tryckgivare.

<i>Typ</i>	<i>Känslighet</i>	<i>Tidskonstant (s)</i>	<i>Maximalt tryck (PSI)</i>
PCB 137A23, ostört	114 resp. 109 (mV/PSI)	> 0,2	50
PCB 106B50, refl.	522 resp.499 (mV/PSI)	2, 1,9	5
Mikrofon	2 mV/Pa		

Utifrån antagandet att trycken kunde variera med mätriktningen har två mätlinjer i ca 80-90 graders vinkel till varandra definierat mätriktningarna (Figur 2-1). Avstånden mellan laddningen och tryckgivarna avsattes utmed mätriktningarna så att två tryckgivare av samma typ alltid placerades på samma avstånd i de två riktningar. Detta möjliggjorde jämförelser av trycken. Tryckmätarna var riktade längs med mätriktningarna mot en referenspunkt nära spränghålen.

För att minska inverkan av markvågor placerades stötdämpare i form av stenull mellan marken och stöden (20 m respektive 30 m). De närmaste tryckmätarna på ca 12 m avstånd satt på en stolpe som var nerslagen i den frusna marken. Rör med diametern ca 10 cm och höjden ca 1 m var satta som skydd mot stenkast. Rören placerades några meter framför tryckmätarna i linje med laddningspunkterna. Tekniken har använts av FOA vid liknande försök.



### 4.3 Tryckgivare för försöksplats två

Trycksignalerna från första mätomgången hade vissa olikheter som verkar hänga ihop med valet av tryckmätare. Speciellt skiljde sig signalerna åt vid jämförelse av ”spjuten” med ”rören”. Vid utvärderingen bedömdes signalerna från ”rören” vara mest stabila mot drift. Dessutom har FOA använt denna mätuppställning vid många tidigare mätningar (Bolling, 2000). Detta ledde till att mätningarna för andra omgången genomfördes med tryckmätare av typen PCB106B50 (Tabell 4-1) i tre mätpunkter utmed en mätlinje vinkelrät mot språnghålens riktning.

### 4.4 Temperaturinversion som orsak till förstärkta tryckvågor

Speciella väderförhållanden, som luftens temperaturskiktning, kan ibland orsaka oväntat höga tryck långt från sprängplatsen. Då markytan och de låga luftskikten avkyls på grund av värmeutstrålning bildas markinversion. Denna kännetecknas av att temperaturen stiger och densiteten minskar med höjden (Mattson, 1970). Skiktningen medför att tryckvågorna kan reflekteras tillbaka mot markytan och fokuseras på en begränsad yta. Ljudet kan alltså bli oväntat starkt på långa avstånd från sprängplatsen. För de aktuella försöken bedömdes avstånden mellan språnghål och tryckgivarna korta i förhållande till avstånden till eventuella temperaturskikt. Störningar av denna typ har därför knappast uppkommit i Hallinden men kan mycket väl förekomma på andra platser om avståndet mellan en sprängplats och t ex boenden är långt.

## 5 RESULTAT

Avsnitten 5.1 och 5.2 visar resultaten från de två försöksomgångarna. Avsnitten innehåller exempel från sprängningar av ett hål i taget med olika grader av utstöttningsbrott i markytan samt de mätta trycken och de integrerade tryck- tidförloppen. De senare benämns impulstäthet I (Fortifikationshandboken del 2, 1991 och Appendix).

Nivåer för friliggande detonerande laddningar har uppskattats med hjälp av prognoslinjer beräknade med hjälp av minsta kvadratmetoden. Kring prognoslinjerna är 95 procentiga konfidensintervall markerade. Den använda ekvationen kan skrivas på formen  $y=a \cdot x^b$  med a och b som passningsparametrar. Ett mått på hur bra prognoslinjen förklarar mätningarna anges med ”Coefficient of determination”  $r^2$ . Nivåerna tjänstgör som referensnivåer till de fördämda laddningarnas förhållandevis låga nivåer. De vanliga skalningslagarna (Fortifikationshandboken del 2, 1991) har använts huvudsakligen för att resultaten ska vara konsistenta med andra liknande försök.

Vid tryckmätningar är tolkningsproblem och felkällor vanliga inom tryckintervallet 170 – 190 dB (Walton, 1981). Vid fältförsök kan 10 % noggrannhet vara en acceptabel nivå. Vanliga källor till låg mätnoggrannhet enligt Walton (1981) anses vara:

1. Acceleration
2. Temperatur
3. Gasdynamik
4. Filtrering
5. Brus
6. Försöksplats
7. Meteorologi

I våra mätningar har vi försökt eliminera punkt 1 genom att placera stenull mellan mätstöden och berggrunden respektive det frusna underlaget, punkt 2 har vi ansett överflödigt för de aktuella små laddningsvikterna som ger förhållandevis små eldklot, punkt 4 och 5 genom att använda mätsystem med inbyggda filter respektive god dynamik och 6 genom att finna en mätplats d v s Hallinden med lämplig geometri. Punkt 7 har diskuterats i avsnitt 4.4. Dessutom har mätsystemen under försöksomgång ett kunnat fungera oberoende av varandra, vilket diskuterats i kapitel 4. Totaltryckets betydelse under punkt 3 har inte undersökts. Andra mätomgången genomfördes med PCB 106B50, som mäter ett kortvarigt reflektionstryck, överlagrat det mer långvariga trycket. Denna störning får mindre betydelse i och med att utvärderingen är relativ, d v s vi jämför försöken på olika djup och med övriga mätförhållanden konstanta.

För försöksplats ett placerades de fördämda laddningarna ca 1,5 m över markplanet och de friliggande framför väggen och över markplanet (Tabell 5-1). Detta kan ha bidragit till vissa reflektions- störningar från markytan. På försöksplats två placerades laddningarna mot markplanet eller i spränghålen och reflektioner torde därför inte ha uppkommit.

Utifrån dessa förutsättningar har mätningarna utvärderats genom att avsätta trycken och skalade impulstätheten mot skalade avstånden i log-log diagram. Detta kan förenklat skrivas som  $P - R^3\sqrt{Q}$  respektive  $I^3\sqrt{Q} - R^3\sqrt{Q}$  med trycken P i Pascal (Pa) och impulstätheten I, i Pascalsekunder (Pas). Avstånden anges med R (m) och laddningsvikterna med Q (kg).

Trycken P, är de avlästa maximala värdena. Impulstätheten I, är integralvärden av trycktid- förloppen av ytan mellan den positiva kurvan och tidsaxeln. Värdena är avlästa när integralen har sitt första maximum d v s när tryck- tid- förloppen skär genom nollnivån.

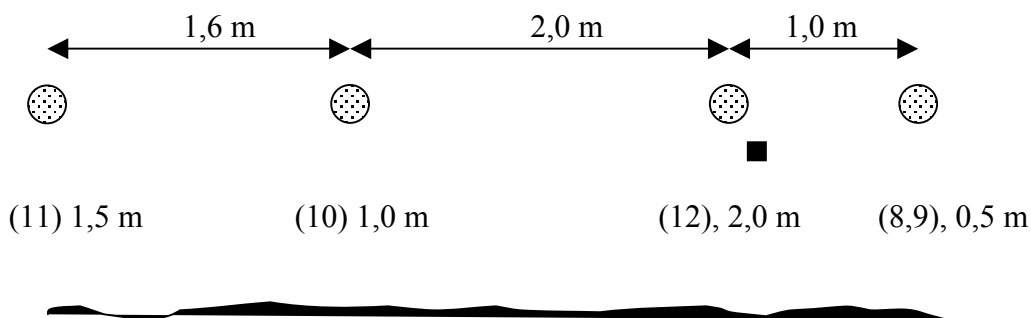
I den första försöksomgången användes endast Dynamex. I den andra försöksomgången användes dessutom sprängdeg och Gurit (avsnitt 3.2). Dessa relateras vanligen till Dynamex genom ekvivalenta viktstyrkor, se avsnitt 3.1 och 3.2. På så sätt elimineras delvis effekterna av sprängämnesegenskaperna och kvar blir den sökta effekten av laddningsdjupen.

Avstånden mellan laddningarna och mätpunkterna har mätts upp under fältförsöken med ett centimetermåttbands noggrannhet. Med tanke på de fältmässiga förhållandena uppskattas noggrannheten till  $\pm 10$  cm.

### 5.1 Tryck och impulstäthet för försöksplats ett

Tabell 5-1 visar genomförda försök och Figur 5-1 schematiskt den ca 5 m höga väggen där friliggande och fördämda laddningar placerades. De friliggande laddningarna placerades i närheten av referenspunkten strax under hålet för laddning 12. De fördämda laddningarna placerades i borrhål ca 1,5 m upp från marken. Dessa är markerade med ringar. Figuren anger försöksnummer, spränghålens djup, och avstånden mellan spränghålen.

Laddning nr 1-3 placerades 2-3 dm ut från väggen och ca 0,5 m upp från markytan och nr 4 placerades på markytan fritt på mätplanen (visas inte i figuren). Laddning nr 6 placerades vid väggen ca 1,5 m till höger om referenspunkten. Fördämda laddningar nr 8-12 visas i Figur 5-1.



**Figur 5-1** Fördämda laddningar med varierande förladdning är markerade med ringar på ca 1,5 meters höjd över markytan. Från vänster räknat finns laddning 11: 1,5 m och 1500 g, laddning 10: 1,0 m och 460 g, laddning 12: 2,0 m och 3175 g samt laddning 8: 0,5 m och 9: 0,5 m och 60 g (omskjutning i samma hål). Avstånden mellan hålen i väggen uppskattades med hänsyn till kraterbildningen för att minimera skador på inte skjutna hål. Referenspunkten (svart kvadrat) ligger strax under hål nr 12. Vid försökstillfället var markytan framför väggen täckt med 5-10 cm snö.

**Tabell 5-1** Friliggande laddningar och laddningar i 38 mm:s spränghål i vertikal vägg. Avstånden till mätpunkterna var ca 10-30 m. I kommentarerna anger ”Vertikalt”, avstånden upp från markplanet och ”Horisontellt” avståndet ut från väggen. De friliggande laddningarna (ej nr. 4 och nr.6) låg nära referenspunkten. <sup>(1)</sup> Signal visas i Appendix.

Mätning, Spränghål	Vikt (g)	Håldjup (m)	Förladdning (m)	Kommentarer
1	95	0	0	Vert. = 0,5 m, Hori. 0,3 m
2	95	0	0	Vert. = 0,5 m, Hori. 0,3 m
3	95	0	0	Vert. = 0,5 m, Hori. 0,3 m
4	190	0	0	Alla tryckmätare på approximativt samma avstånd. Laddning långt från reflekterande vägg.
6	95	0	0	Ca 1,5 m till höger om fixpunkten
8	60	0,5	0,45	Pluggen uttryckt, hålet i stort sett oskadat
9 <sup>(1)</sup>	60	0,5	0,45	Pluggen uttryckt, hålmynningen något skadad (Omskjutning av 8)
10	460	1,0	0,70	Pluggen uttryckt, utstötningsbrott
11	1500	1,5	0,72	Pluggen uttryckt, kraftigt uppsprucket
12	3175	2,0	0,25	Pluggen uttryckt, kraftigt uppsprucket

Flera faktorer har haft betydelse för spridningen av mätvärden kring passningslinjerna och speciellt svårt var det att upptäcka tydliga trender.

De viktigaste faktorerna för mätvärdesspridning var:

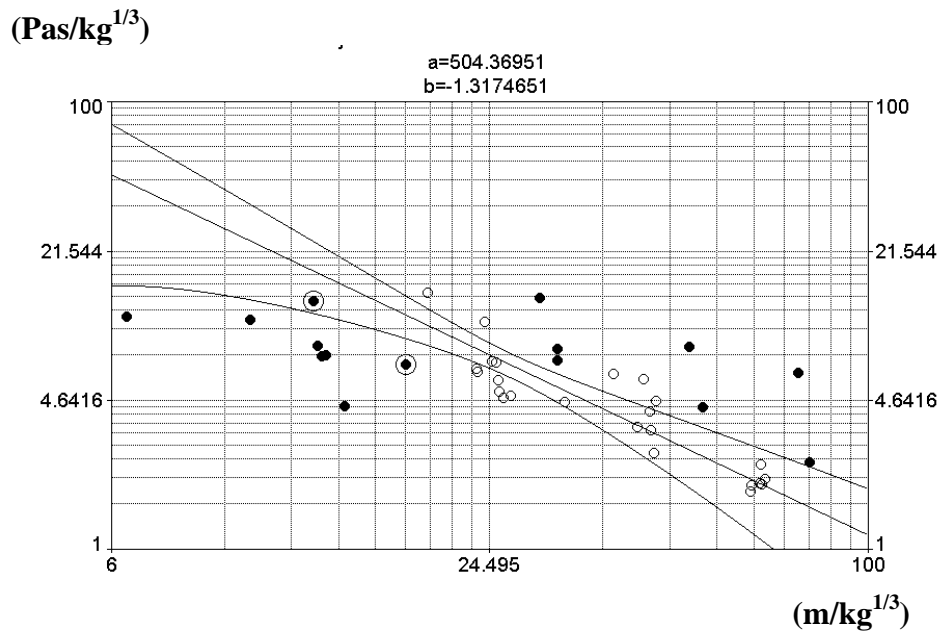
- Olika typer av tryckmätare
- Riktningberoendet
- Reflektionstryck/ostört tryck
- Låg noggrannhet vid avläsning av topptryck beroende på begränsningar i instrumentens samplingshastighet (speciellt vid snabba stigtider och kortvariga topptryck)

Figur 5-2 visar att stora block har lossnat i svaghetsplan, sannolikt av geologisk ålder. De flesta stora blocken har fallit ut vid sprängning av de fördämda laddningarna på 1500 gram (till vänster) respektive 3175 gram (till höger.)

Figur 5-3 visar skalade impulstätheten mot skalade avstånden för de friliggande laddningarna 1-6. Här var ”coefficient of determination”  $r^2 = 0,701$ , intercept  $a = 504$  (Pas/kg<sup>1/3</sup>) och lutning  $b = -1,32$ . De fördämda 1500 grams laddningarna (11) och 3175 grams laddningarna (12) är markerade med fyllda ringar och ligger under medellinjen.



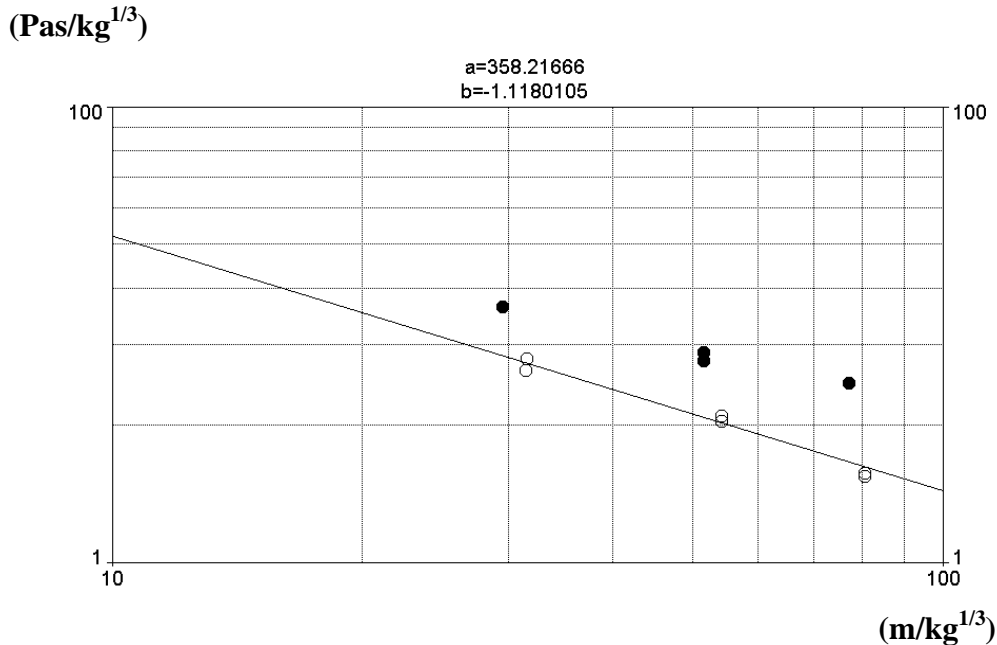
**Figur 5-2** Väggen för försöksplats ett har svaghetsplan som delvis definierar de utsprängda blockens storlek. Det var därför ej möjligt att på ett meningsfullt sätt beräkna den utsprängda volymen berg utifrån en tänkt konisk utsprängd bergvolym.



**Figur 5-3** Friliggande och fördämda laddningar. Skalad impulstäthet – skalat avstånd ( $I^3\sqrt{Q} - R^3\sqrt{Q}$ ) med impulstätheten  $I$ , i Pascalsekunder (Pas) och  $Q$  (kg). Fyllda ringar till vänster markerar fördämda 1500 gram respektive 3175 gram. För 1500 grams laddningar gav de båda mätpunkter på mätlinjen längs med spränghålen högre värden (markerade med extra ring) än de som låg på mätlinjen längs med väggen. Fyllda ringar över passningslinjen markerar 60 grams laddningarna.

Riktningens beroendet, ca en faktor 2, visas tydligast för de fördämda 60 grams laddningar, Figur 5-4. Här var  $r^2 = 0,977$ ,  $a = 358$  ( $\text{Pas}/\text{kg}^{1/3}$ ) respektive  $b = -1,11$  för mätvärden rakt ut i linje med spränghålen. Dessa är markerade med ringar och gäller mätningarna 8-9,

Tabell 5-1. Figur 5-3 ovan visar för övrigt att värdena från 60 grams laddningarna ligger orimligt högt.



**Figur 5-4** Skalad impulstäthet – skalat avstånd ( $I^3\sqrt{Q} - R^3\sqrt{Q}$ ) för 60 grams laddningar i 0,5 m djup hål med förladdning. Figuren visar effekten av att mäta i två riktningar ut från språnghålet. De öppna cirklarna och regressionslinjen gäller mätningar 80-90 grader ut från språnghålen.

### 5.1.1 Uppsprickningsförlopp och karakteristiska tryck

I våra försök har geologiska sprickor och svaghetsplan spelat en betydande roll för uppsprickningen. Detta är speciellt tydligt för laddningar större än 460 gram. Sprickor och svaghetsplan har öppnats men blocken står kvar efter detonation av 460 grams laddning. För laddningarna på 1500 gram respektive 3175 gram har bergblock, begränsade i svaghetsplan, kastats ut ur väggen. Bergmassan har alltså inte alls sprängts ut som en konform vilket vi sett vid tidigare försök.

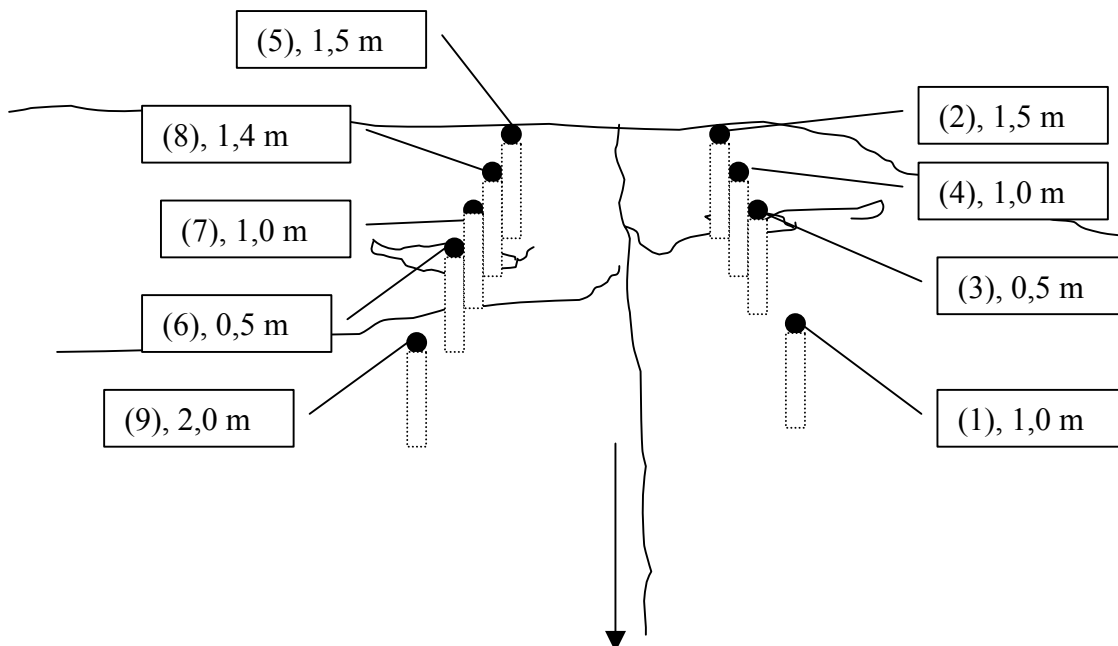
Blair & Little (1991) har visat att en så kallad "Air Pressure Puls, APP" som genereras vid pallfrontens rörelse, har lågt tryck och frekvens i förhållande till en oförutsägbar, "Gas Release Puls, GRP", som genereras vid när gas strömmar ut ur sprickor. En annan typ "Stemming Release Puls SRP", som orsakas av att förladdningen trycks ut, har samma karaktär som GRP. Våra mätningar visar på olika nivåer beroende av mätriktning. Riktningar längs språnghålen ger störst värden (faktor 2-3). Detta kan tolkas som att vi mäter en SRP.

Några tydliga samband mellan uppsprickningsförloppen och tryckvågens karaktär gick inte att finna för våra försök för omgång ett. Speciellt svaghetsplan och sprickor anses kunna orsaka en ”Gas Release Puls” GRP alternativt en ”Stemming Release Puls SRP” när förladdningen trycks ut vid så kallad ”Blow out”. Dessa båda verkar vara svårast att kontrollera. Våra försök tyder på att gruspluggen i ett tidigt skede har tryckts ut och att vi fått en SRP/GRP.

För övrigt var mätningarna av acceleration i bergets yta mer tidsödande än beräknat och avbröts under första mätomgången till fördel för tryckmätningarna.

## 5.2 Tryck och impulstäthet för försöksplats två

Mätningar av Persson m.fl., (1994), har visat att fördämda laddningar ger väsentligt lägre tryck än då samma laddningar detonerar i fria luften. Vid jämförelser av uppmätta tryck  $P_{obs}$  för avladdade hål med beräknade,  $P_{ber}$ , i luft fick man en dämpningsfaktor  $T = P_{obs}/P_{ber} = 0,4 - 0,5$  d v s ca 40 -50 % av en fritt upphängd laddning. En förladdning reducerade ytterligare trycket. I våra försök i en Bohusgranit inleddes mätningarna med två stycken friliggande laddningar (Test 1 och 2) och ytterligare två (Test 3 och 4) senare. De fördämda laddningarnas placering visas nedan i Figur 5-5. Mätriktningen markeras med en pil.



**Figur 5-5** Försöksplatsen visar 5 stycken spränghål till vänster och 4 stycken spränghål till höger om mätlinjen som anges med en pil. Hålet närmast till vänster som ursprungligen är ett 2,0 meters hål benämns hål 9 och är en omskjutning. Botten av hålet, upp till 1,5 m är fyllt fingerus för att få hålet jämförbart med hål 5 (förlorad registrering).

**Tabell 5-2** Genomförda försök för försöksplats två. Avstånd från spränghålen till mät - punkterna har varierat ca 9 – 43 m. Mätning 9 är en omskjutning av mätning 5 i 2 meters hål med 0,5 m fingrus i botten.

<i>Mätning Sprängh.</i>	<i>Spräng- ämne (g)</i>	<i>Håldjup Planerat/ Uppmätt (m)</i>	<i>För- laddning Planerad/ Uppmätt (m)</i>	<i>SD (Dist,Q)</i>	<i>Kommentarer till Sprängresultaten</i>
1	Deg, 460	1,0/1,0	0,7/0,7	1,10	Vatten, mycket uppsprucket berg, Utstötning
2	Deg, 460	1,5/1,45	1,20/1,20	1,73	Pluggen kvar
3	Dx, 460	0,5/0,48	0,20/0,15	0,46	Utstötning
4	Dx, 460	1,0/1,0	0,70/0,65	1,10	Uttryckt plugg
5	Dx, 460	1,5/1,5	1,20/1,20	1,74	Uttryckt plugg (1:a), Triggfel Pluggen kvar (2:a)
6	Gu, 390 Dx, 60	0,5/0,5	0,20/0,15	0,38	Utstötning
7	Gu,390 Dx 60	1,0/0,97	0,70/0,70	1,00	Uttryckt plugg
8	Gu, 390 Dx, 60	1,5/1,4	1,20/0,80	1,68	Pluggen kvar
9	Dx, 460	1,5/1,5	1,20/1,20	1,74	Ersätter mätning 5
Test 1	Dx, 120	0	0	0	Fritt på ytan
Test 2	Dx, 480	0	0	0	Fritt på ytan
Test 3	Dx, 120	0	0	0	Fritt på ytan
Test 4	Deg, 130	0	0	0	Fritt på ytan

Jämfört med försöksplats ett fick vi allmänt bättre tryckdata från försöksplats två. Detta kan delvis förklaras med att vi använde endast en typ av tryckmätare d v s ”rören” och att mätningarna genomfördes endast vinkelrät mot spränghålet.

### 5.2.1 Tre uppsprickningsförlopp samt karakteristiska tryckvågor

Ur Tabell 5-2 ovan har vi definierat 3 stycken typiska sprängresultat eller fall som de uppmätta tryckvågorna kan sättas i samband med. Vi har utgått ifrån de mätta topptrycken och impulstätheterna för friliggande och fördämda laddningar samt från SD-värdena. Fall 1 är ett utstötningssbrott för SD-värden på 0,4-0,5, fall 2 gäller utblåsning av plugg för SD-värden omkring 1,0 och fall 3 med mycket låga tryck och impulstätheter för SD-värden över ca 1,1. Ett specialfall, fall 4, är fritt liggande laddningar med de högsta värdena för tryck och impulstäthet. Detta fungerar som referensfall vid uppskattning av dämpningen. Figurerna nedan visar bilder av sprängresultaten samt trycken och impulstätheterna i



log – log diagram. En linje har passats till värdena för de friliggande laddningarna för att hitta en referensnivå.

Ett exempel från fall 1 visas i Figur 5-6 nedan. Detta är ett utstötningsbrott från sprängning 3 med 460 gram Dynamex i ett 0,5 m djupt hål. Fingruspluggen var ca 0,15 m. Värdet för SD var ca 0,5 vilket indikerar maximal lufttryckvåg, kraterbildning och stenkast. Brottet i markytan är cirkulärt. Tryckfasen bör ha dominerats av en SRP/GRP.

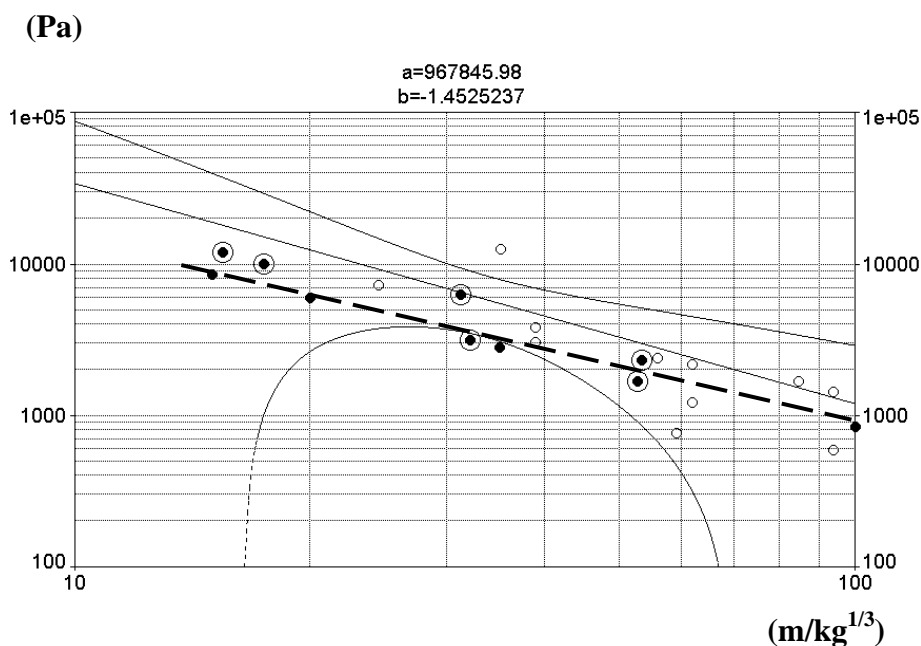


**Figur 5-6** Sprängning 3 med ca 460 gram Dynamex (VOD = ca 5000 m/s) i ett ca 0,5 m djupt hål. Förladdningen av fingrus är ca 0,15 m, störda radien i ytan är ca 50 cm och SD = 0,46.

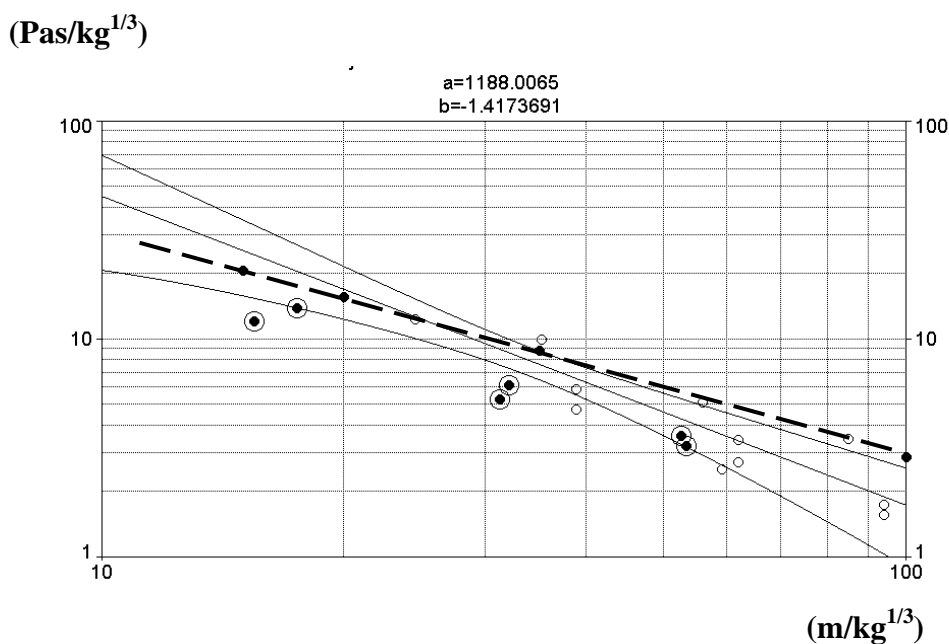
Figureerna 5-7 och 5-8 visar att fördämningen (Fall 1), sänker topstrycken och impulstätheten endast marginellt för Dynamex och Gurit (sprängämnet i sig tycks inte spela någon större roll för värdena) jämfört med den heldragna medellinjen för värdena från de friliggande laddningarna. Skillnaden eller dämpningen är knappt signifikant. Fördämningen är följaktligen för svag när man påtagligt vill minska miljöpåverkan i form av tryckvågor, stenkast och skador i omgivningen.

Figureerna visar också att impulstätheten är ett relativt bra mått på skaderiskerna. Prognoserna blir säkrare; ”coefficient of determination” för tryck- avståndsdata (Figur 5-7) är  $r^2 = 0,505$  vilket skall jämföras med det högre  $r^2 = 0,877$  för impulstätheten (Figur 5-8). Notera att  $r^2$ - värdena gäller de friliggande laddningarna. Regressionslinjen i Figur 5-8 får intercept = 1188 (Pas/kg<sup>1/3</sup>) respektive lutningen = -1,42.

Beräknade värden för friliggande TNT enligt Kingery och Bulmash (1984), streckdragen linje och fyllda små cirklar, ligger approximativt på gränsen till det undre 95 procentiga konfidensintervallet för tryck, och delvis över den övre intervallgränsen för impulstäthet. Konfidensintervallen gäller våra försök med friliggande laddningar.



**Figur 5-7** Tryck mot skalat avstånd ( $P - R^3\sqrt{Q}$ ) för fördämda (0,15 m) laddningar. Mätningarna 3 (Dynamex) och 6 (Gurit) markeras med stora ringar, de friliggande laddningarna visas med små ringar och passningslinje. ”Coefficient of determination”  $r^2 = 0,501$ . Intercept  $a = 967,8$  KPa och lutningen  $b = -1,45$ .



**Figur 5-8** Skalad impulstäthet – skalat avstånd, ( $i^3\sqrt{Q} - R^3\sqrt{Q}$ ). Fördämda laddningar (0,15 m) har stora ringar (mätning 3 och 6) i förhållande till friliggande laddningar med ringar och passningslinje. För linjen gäller att ”Coefficient of determination”,  $r^2 = 0,877$ , Intercept  $a = 1188$  och lutningen  $b = -1,42$ . Beräknade värden visas med streckdragen linjer.

Ett exempel från fall 2 visas i Figur 5-9. Gruspluggen har tryckts ut och markytan är svagt påverkad jämfört med fall 1. Någon egentlig uppsprickning som för fall 1 har inte noterats. Värdet för SD i detta exempel är 1,0, håldjupet ca 1 m och förladdningen ca 0,7 m. Sprängämnenas är 390 gram Gurit och 60 gram Dynamex.

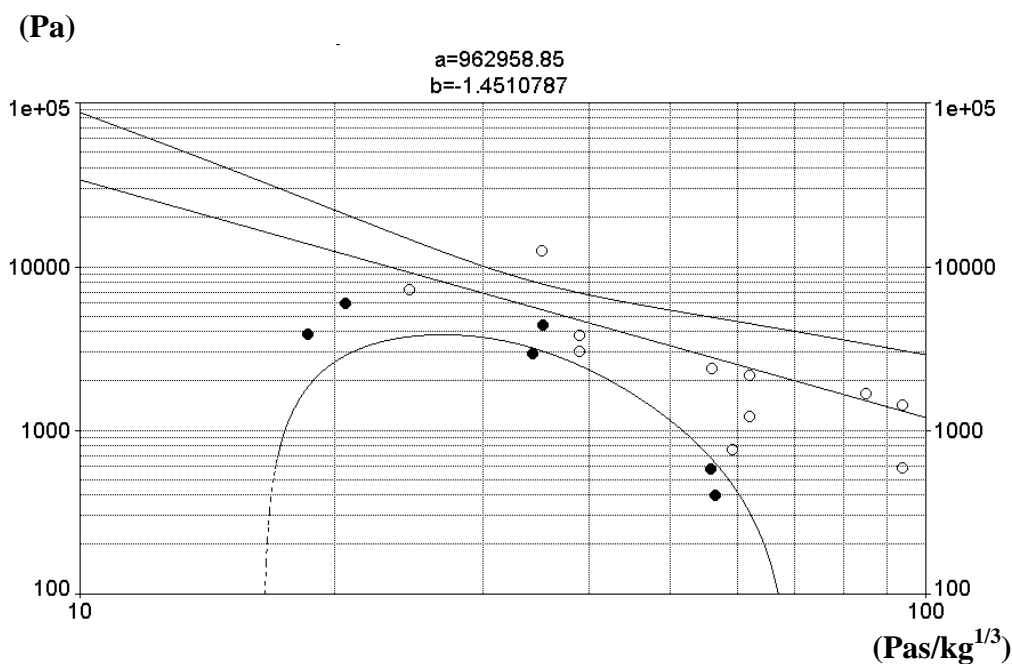
Den uppmätta tryckvågsfasen, huvudsakligen en SRP, är resultatet av att sandproppen inte kunnat hålla emot språnghålstrycket varvid förbränningsprodukterna gått direkt ut i fria luften. Några andra karakteristiska tryckvågor t ex från vibrationsrörelser i bergets yta (RPP) har inte noterats.



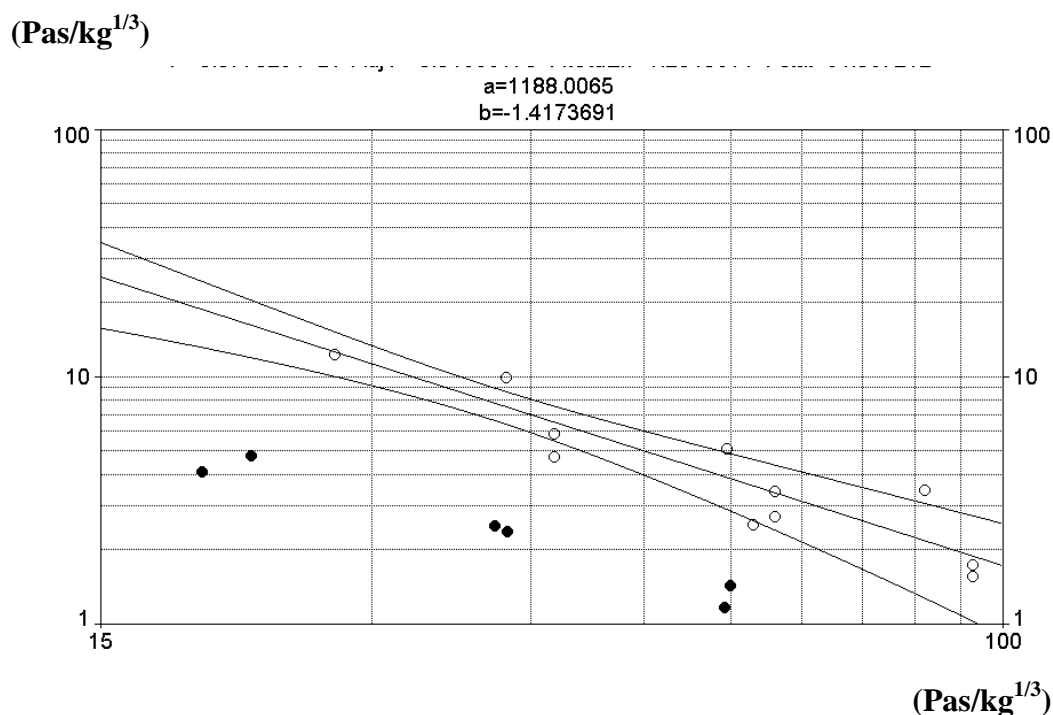
**Figur 5-9** Sprängning 7 med ca 390 gram Gurit (VOD = 2000 m/s mätt på friliggande 17 mm rörladdning) och 60 gram Dynamex i ett ca 1,0 m djupt hål. Förladdningen av fingrus är ca 0,70 m. Ingen tydlig störning noterades på markytan. Värdet på SD var 1,74.

Figureerna 5-10 och 5-11 visar att topptrycken och impulstätheten i mätpunkterna har sjunkit märkbart jämfört med värdena från de friliggande laddningarna. Särskilt tydliga är resultaten för impulstätheten i Figur 5-11. Dämpningen ligger här tydligt under konfidensintervallets nedre gräns och är en faktor 2-3. Fördämningen har alltså fungerat bra.

Vi lägger inte in beräknade värden för TNT igen. ”Coefficient of determination” för tryck- avståndsdata för friliggande laddningar är samma som tidigare. Det som huvudsakligen skiljer sig från fall 1 är laddningarnas djup.

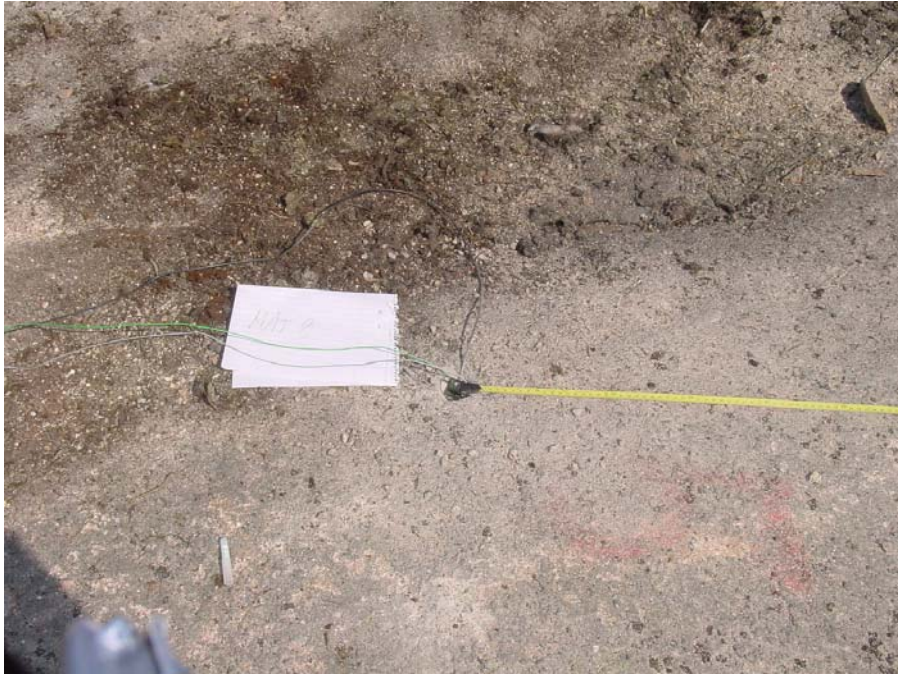


**Figur 5-10** Tryck – skalat avstånd ( $P - R^3\sqrt{Q}$ ). Fördämda laddningar (0,70 m) med fyllda ringar (mätning 4 och 7) i förhållande till friliggande laddningar med öppna ringar och passningslinje.



**Figur 5-11** Skalad impulstäthet – skalat avstånd, ( $i^3\sqrt{Q} - R^3\sqrt{Q}$ ). Fördämda laddningar (0,70 m) med fyllda ringar (mätning 4 och 7) i förhållande till friliggande laddningar med öppna ringar och passningslinje.

Fall 3 karakteriseras av två helt olika sprängningsförlopp som båda har orsakat mycket låga tryckvärden. Det första exemplet, laddning 8 i Figur 5-12, visar ett försök som gett minimala störningar på markytan. Gruspluggen och tändkabeln finns kvar efter sprängning, vilket måste innebära att den enda möjliga karakteristiska tryckfasen är en RPP. Hålet (ca 1,4 m) var laddat med ca 390 gram Gurit och 60 gram Dynamex. Förladdningen var ca 0,80 m.



**Figur 5-12** Sprängning 8 med ca 390 gram Gurit (VOD=2000 m/s) och 60 gram Dynamex i ett ca 1,4 m djupt hål. Förladdningen av fingrus är ca 0,80 m. Gruspluggen är kvar efter sprängning och ingen störning på markytan. Värdet på SD var 1,68.

Det andra exemplet (Figur 5-13) visar sprängning 1. Bergets yta har spruckit sönder och flera stora block har bildats. Vi kunde notera vatten i hålet före sprängning som var laddat med ca 460 gram sprängdeg och dämt med ca 0,7 m grusplugg. En tolkning är att trycket i spränghålet har sjunkit förhållandevis långsamt. Den typiska knallen, från t ex en SRP, uteblev också i detta fall vilket understryker att SRP är oförutsägbar till sin natur.

För sprängämnet gäller att explosionstrycket  $P_e$  kan approximeras med  $P_e = 1/8 \rho VOD^2$  med  $\rho$  som sprängämnets densitet och VOD som detonationshastigheten.



Notera också att: 1)  $VOD_{\text{sprängdeg, Dynamex}} \gg VOD_{\text{Gurit}}$  vilket medför att borrhålstrycken (t ex Nie m. fl., 2000) för sprängdeg respektive Dynamex är ca 10 gånger större än för Gurit, 2) att vatten är ett starkt verkande medel för ökad koppling mellan sprängämnet och hålväggen med ökade spricklängder som resultat (Ouchterlony m. fl., 1999) och 3) att sprängämnen med VOD – värden på 2000 m/s som t ex Gurit ger klart svagare sprickbildning än sprängämnen med VOD – värden på 5000-5500 m/s (t ex Nyberg m. fl., 2000).



**Figur 5-13** Sprängning 1 med ca 460 gram pentylsprängdeg (VOD=5986 m/s för ren PETN) i ett ca 1,0 m djupt hål och med förladdning på ca 0,7 m. Värdet SD var ca 1,1.

Topptrycken och impulstätheterna för både höga respektive låga VOD (Fall 3) sjönk alltså ner till mätsystemets aktuella brusnivå. På grund av detta har inte några exakta värden angetts. Nivåerna är klart under de lägsta mätta vilket visar att både de starka (APP) och svaga rörelserna (vibrationer eller RPP) har spelat en mindre roll för uppkomsten av tryckvågorna. Tiden som gruspluggen sitter kvar och hastigheten som spränghåltrycket tryckavlastas med, spelar sannolikt en avgörande roll för uppkomsten av tryckvågor.

Fall 4 gällde försök med friliggande laddning. Dessa har redovisats tidigare i kapitel 5.

## 6 SLUTSATSER

### Försöksplats ett den 23 februari – 3 mars 2001

Försöken visade inte på några tydliga samband mellan karakteristiska tryck och uppsprickningsförlopp eller mellan förladdningslängderna och topptrycken respektive impulstätheterna. Detta kan bero på att:

- Tre separata mätsystem inklusive tryckgivare har använts vilket i första hand var tänkt minska riskerna för systematiska fel samt att visa på eventuella skillnader mellan tryckvågornas former och nivåer. För övrigt har kurvformerna från tryckgivaren PCB 106B50 en kort överlagrad reflektionstopp som inte finns i data från PCB 137A23.
- Den så kallade samplingshastigheten spelar som alltid, en viktig roll vid mätningar. Speciellt vid mätningar av stötvågor är tryckvariationerna snabba vilket kan minska noggrannheten toppvärdesavläsningarna.
- Ansatsen att hålla  $Q/V$  ( $\text{kg/m}^3$ ) konstant misslyckades på grund av att Bohusgraniten sprack upp i befintliga svaghetsplan och att koniska former på kratrarna uteblev. Mätningarna av utsprängd bergvolym var därför inte meningsfull.

### Försöksplats två den 25-28 juni 2001.

I stället för att hålla  $Q/V$  ( $\text{kg/m}^3$ ) konstant användes konstanta laddningsvikter  $Q$ , tre olika sprängämnen (Dynamex, Gurit och pentylsprängdeg) och spränghål med varierande djup (0,5-1,5 m). Resultaten blev genomgående mer lättolkade än för försöksomgång 1. De viktigaste slutsatserna är:

- Värdet på  $SD$  ”, Scaled Depth of burial”, som understiger 0,4-0,5 (Fall 1) med förladdning på ca 0,15 m medför endast marginell sänkning av tryck och impulstäthet. I dessa fall trycks gruspluggen ut och stötvågorna orsakar tydliga utstötningsbrott och sprickbildningar i graniten. De karakteristiska trycken bedöms vara en kombination av en större del SRP och en mindre del GRP.
- För  $SD$ -värdet på ca 1,0-1,1 (Fall 2) och med förladdning på ca 0,7 m trycks gruspluggen ut men någon egentlig sprickbildning i graniten sker inte. Impulstätheten minskar i dessa fall med en faktor 2-3. Tryckvågen är till största delen en SRP d v s förbränningsprodukter som strömmar ut ur spränghålet.
- Fall 3 karakteriseras av att tryck och impulstäthet sjunker ner till mätsystemets brusnivå.  $SD$ -värdena kan variera 1,1-1,7. I dessa fall sitter gruspluggen kvar i spränghålet efter sprängningen eller så länge att spränghålstrycket sjunker genom att gasen läckage ut i sprickorna. Detta visar dels att bergets relativt

svaga rörelser (RPP) spelar en underordnad roll för uppkomsten av lufttrycksvågor och dels att tiden som gruspluggen sitter kvar i hålet är viktig.

- Sprängämnet Gurit ger i mätpunkterna något lägre tryck och impulstäthet än Dynamex vid ca 0,5 m laddningsdjup och med 0,15 m förladdning. Detta kan förklaras med Guritens förhållandevis mycket låga VOD och borrhålstryck samt den relativt svaga sprickbildning som den orsakar.
- Värdet på ”Coefficient of determination”  $r^2$  skiljer sig markant mellan de två representationerna tryck- tid respektive impulstäthet- tid. Impulstätheterna verkar vara de mest tillförlitliga värdena av de båda när det gäller att hitta bästa passning till en enkel funktion.

## **7 ERKÄNNANDE**

Vi vill tacka Tage Lundgren med anställda för ett trevligt mottagande och all hjälp under de två fältmättningsperioderna, projektets referensgrupp för värdefulla frågor och svar som lett arbetet framåt samt Shulin Nie och Mats Olsson för hjälp vid datainsamlingen i Hallindens blockstensbrott.



## 8 REFERENSER

Blair D P and Little T N, 1991: Airblast Overpressure due to blasting in open pits, Proc. AusIMM Regional Conf. Calgoolie.

Bolling K G, 2000: Privat samtal, FOI, Stockholm.

Chiappetta R F 1998: Choosing the right delay timing for the blasting application, optimisation and maintaining field controls, Blasting Analysis, INC, Eight High- Tech Seminar, s 242-246, Nashville.

Eriksson S, 1991: Tryckmätning är svårt, Fortifikationsförvaltningen, Rapport C2:91, Eskilstuna.

Eriksson S, Vretblad B, Nilsson U, 1991: Fortifikationshandboken del 2, Kap. 4-6, Försvarsmedia, Stockholm.

Felice J J, Klass W, Spathis A T, 1992: Burden Velocity Measurement in Blasting Operation at Mount Thorley Mine Using Powerwave Face Velocity Radar, SEE, Orlando.

Gibbs T R and Popolato A, 1980: LASL Explosive Property Data, University of California Press Berley and Los Alamos, California.

Kingery and Bulmash, 1984: Air Blast Parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground Maryland.

Lundegård P-H, Lundqvist J Lindström M, 1978: Berg och jord i Sverige, Almqvist & Wiksell Läromedel AB, Stockholm.

Mattson J O, 1970: Meteorologi, Gleerups bokförlag, Lund.

Nie S, Deng J, Ouchterlony F, 2000: Expansionsarbete av ett emulsionssprängämne i borrhål- mätning och simulering, SveBeFo Rapport 48,

Nyberg U, Fjellborg S, Olsson M och Ouchterlony F, 2000: Bedömning av sprängskador i ortkontur, Vibrationsmätningar, skadeprognoser och sprickkartering i magnetitmalm och gråberg, SveBeFo Rapport 50, Stockholm.

Olsson M, 1997: Sprickutbredning vid flerhålsprängning, ,sammanfattande rapport av försöksperioden 1993-96, SveBeFo Rapport 32, Stockholm.

Ouchterlony F, Olsson M och Bovik S-O 1999: Bench Blasting in Granite with holes with axial notches and radial bottom slot, South African Institute of Mining and Metallurgy, symposium serie S21, Johannesburg.

Persson P A, Holmberg R, Lee Jaimin, 1994: Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, Inc, Boca Raton, Florida.

Reidarman L, 1997: Reducering av luftstöt vågor vid sprängning under mark, SveBeFo Rapport S5, Stockholm.

Rohman G, 2001: Information om Södra Länken, Boende och Trafikantundersökning December 2000, Rapport 2001:0468, Vägverket Region Stockholm.

Rundqvist G, 1998: Tunneldrivning med klenhål, en ny gammal metod, Diskussionsmöte BK- 98, sid. 99-110, Stockholm.

Sisikind D E, Stackura V J, Stagg M S, and Kopp J W, 1980: Structure Response and Data produced by Air Blast From Surface Mining, Us Bureau of Mines, Rapport 8485, Pittsburg, PA.

Walton W S 1981: Improvement of Air Blast Measurement, US Army Aberdeen Proving Ground, Maryland.

Wiss J F, och Linehan P, 1978: Control of Vibration and Air Blast Noise from Surface Coal Mining, US Bureau of Mines, Rapport 103(4) -79.

## 9 APPENDIX

### 9.1 Utrustning för mätning och analys

Förteckning över instrumentens tekniska specifikationer

Centralenhet 1:	Bandspelare av typen SONY SIR 1000 med 16 kanaler och med 20 kHz vardera. Bandbredd vid normal bandhastighet är 20 kHz. Band av AIT- typ med 25 GB kapacitet. Dynamiskt omfång är på minst 80 dB (16-bit).
Dataöverföring 1:	Adaptec 2940 Ultra Wide.
Analys 1:	Pcscan 3 Streamer V 1.4.
Centralenhet 2:	Oscilloskop av typen LeCroy 9354A, 500MHz vid användning av 4 kanaler. Minnesdjup på 50k med dynamiskt omfång på minst 8-bit.
Dataöverföring 2:	LeCroy Scope Explorer Version 2.16.
Analys 2:	Mathcad 2000.
Kablar:	Koaxialkablar av typen RG 58.
Förstärkare:	Endevco typ 2793 för 16 kanaler. PCB batteridrivna för en kanal.
Tryckmätare:	PCB 137A23 PCB 106B50 Mikrofon
Tryckmätarstöd:	Typ 1: Vertikalt stålrör och stötdämpande material emot det vertikala röret för PCB 106B50 och mikrofon. Typ2: Vertikalt stålrör, stötdämpande material för PCB 137A23.

## 9.2 Upphängning av tryckmätare

Tryckmätarstödet nedan, är den typ som använts under båda försöksomgångarna för tryckmätaren PCB 106B50 (Se även figur 4.1) som sitter i mitten av det horisontella rörets högra ände. Röret var löst upphängt på enklaste vis; en typ av packningsplast som ofta används vid transporter av elektronisk utrustning. Från rörets borte ände löper mätkabeln till förstärkaren och centralenheten.



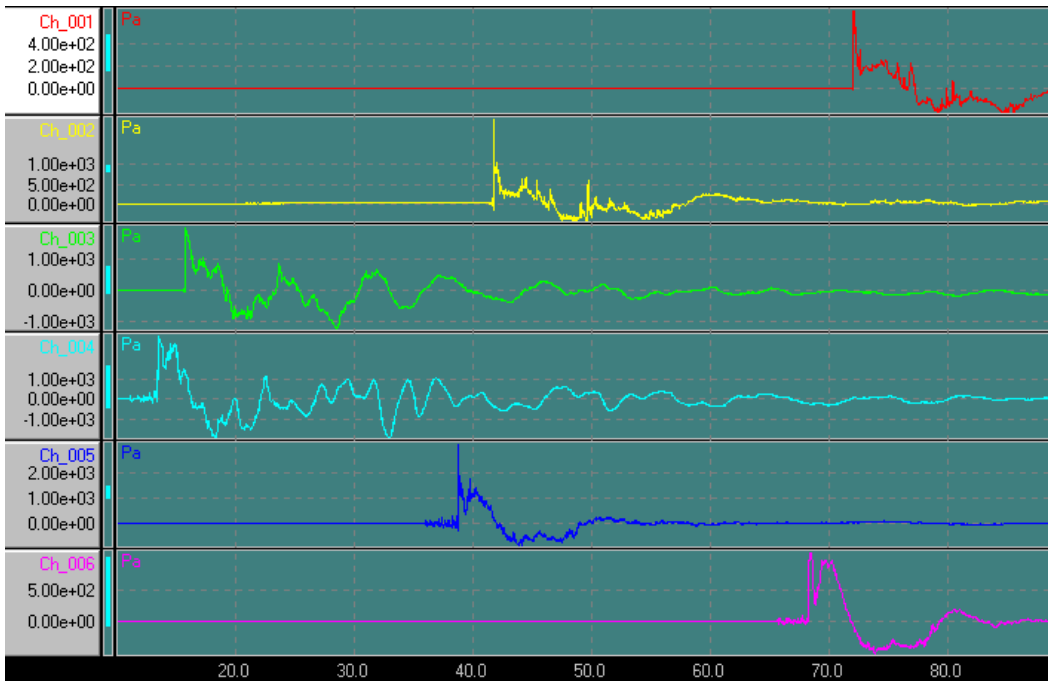
### 9.3 Utplacering av tryckmätare

Figuren nedan visar, förutom Rickard Forsén, tre stycken mätpunkter snett bakom tre stycken rör för skydd mot stenkast. Stenull placerades mellan mätstöden och det frusna underlaget för att eliminera att markvibrationer fortplantar sig till stödet.

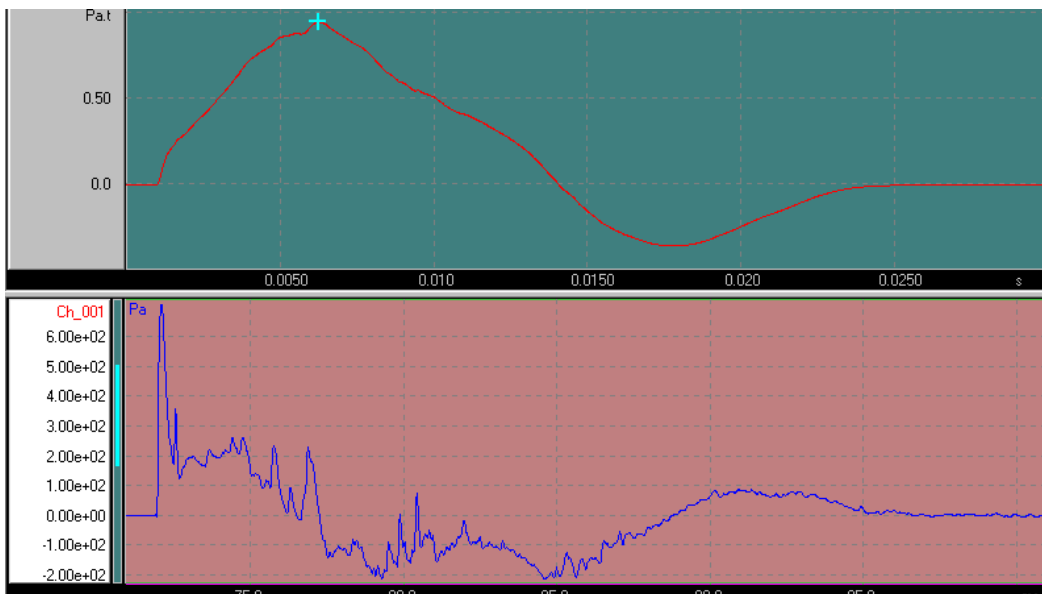


### 9.4 Exempel på signaler från första försöksomgången

Figuren nedan visar exempel på trycksignaler från första försöksomgången mätning nummer 9 från en innesluten 60 grams laddning. Kanalerna 1-3 visar i tur och ordning räknat uppifrån signaler från mikrofon på ca 30 meters avstånd, PCB 106B50 på ca 20 meters avstånd och ostört tryck från tryckmätare av typen PCB 137A23 på ca 12 meters avstånd. Kanalerna 4-6 visar i omvänd ordning liknande tryckkurvor från samma typ av tryckgivare. Skillnaden mellan de två grupperna är riktningen till spränghålet. Trycken anges i pascal (P) som funktion av tid (ms).

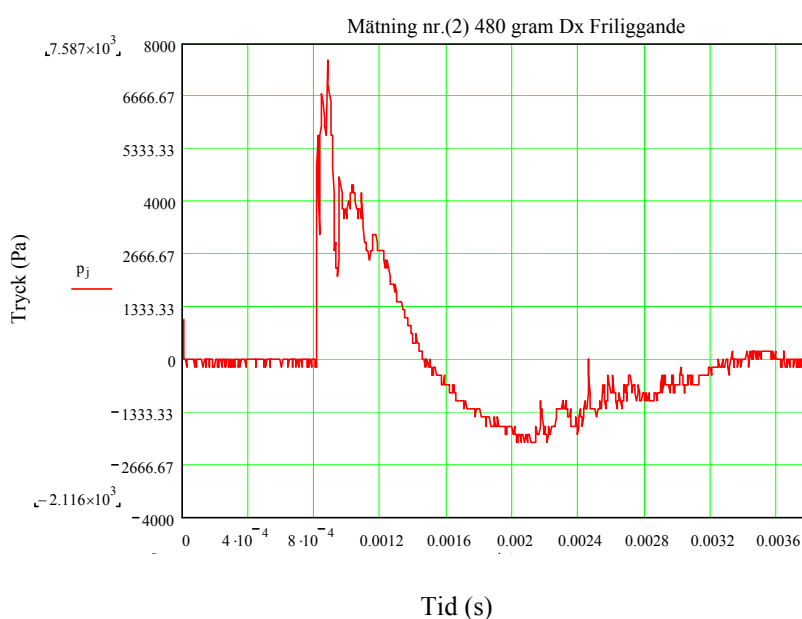


Figuren nedan visar tryckförloppet i Pa, (nedre kurvan) och impulstätheten  $d v s$  integralen av övertrycket i  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ , (övre kurvan).



### 9.5 Exempel på signal från andra försöksomgången

Nedan visas ett exempel på uppmätt trycksignal från andra försöksomgången. Mätning var nummer 2, en friliggande 480 grams Dynamex- laddning. Signalen är mätt med en PCB 106B50 som för övrigt användes som enda tryckmätare under denna mätomgång. Trycket anges som tidigare i pascal (Pa) som funktion av tid (ms). Signalerna lagrades ursprungligen på vårt oscilloskop (LeCroy 9354A) och överfördes till pc för analys i Mathcad 2000.



Figuren ovan visar ett brusigt stötförlopp som huvudsakligen beror på mätsystemet (elektroniskt brus) och inte på några tryckvariationer. Bruset är tydligt med litet i jämförelse med signalstyrkan. Signalen är inte efterfiltrerad.