

**EXPANSIONSARBETE AV ETT  
EMULSIONSSPRÄNGÄMNE  
I BORRHÅL -  
MÄTNING OCH SIMULERING**

**Expansion work of an emulsion  
explosive in blast hole -  
measurement and simulation**

Shulin Nie  
Junhua Deng  
Finn Ouchterlony

SveBeFo Rapport 48

Stockholm 2000  
ISSN 1104-1773  
ISRN SVEBEFO-R--48--SE

## Förord

I SveBeFos arbete för att förstå sprängämnens verkan i berg har tidigare rapporterats från utvecklingen av en brinnmodell, som beskriver det fysikaliska förloppet bakom detonationsfronten i en laddning. Genom en serie experiment och jämförelser med teoretiska beräkningar visades hur olika sammansättning av sprängämnet påverkar detonationsförlopp. I föreliggande rapport redovisas försök med ett emulsionssprängämne som motsvarar gängse kommersiella sprängämnen. Experiment och matematiska simuleringar har gjorts för att demonstrera energiutveckling och expansionsförlopp, där trycken mätts upp med den så kallade LHM-tekniken, som tagits fram vid SveBeFo. Aktuella, mycket kortvariga tryck är i storleksordningen 5 - 10 GPa, och huvuddelen av förloppet har kunnat registreras och beräkningsmässigt verifieras vid försök i granitblock och en pallkant i kalkberg. En mindre modifiering av mätcellen har föreslagits för kommande försök, men redan uppnådda resultat är viktiga i kunskapsuppbyggnaden för att bättre kunna styra val av sprängämne och håldiameter för ett effektivt och väl kontrollerat sprängningsresultat i olika tillämpningar.

Fortsatta undersökningar har inletts för att bestämma arbetsförmågan hos blandningar av emulsion och ANFO, bland annat med hjälp av cylinderexpansionstester i samarbete med FOA. Samtidigt modifieras LHM-cellen inför senare bestämning av brinnmodeller för dessa sprängämnen.

Projektet följs av SveBeFos "referensgrupp för detonik", under ordförandeskap av Stefan Lamnevik, FOA, och med representanter för Dyno Nobel och Kimit.

Stockholm i maj 2000

Tomas Franzén

## Sammanfattning

Att kunna styra sprängning och uppnå önskat resultat fordrar kunskaper om ett sprängämnes detonationsförlopp i borrhålet, dvs kunskaper om hur sprängämnets energi omsätts och överförs till berget. Dock är de kunskaperna inte lätt tillgängliga. T ex saknas det både mätrutiner och beräkningsmodeller för sprängämnets expansionsarbete i borrhål.

Forskningen som beskrivs i rapporten omfattar både mätning och simulering. Ett forskningssprängämne har tillverkats och använts vid sprängning i 37 mm hål i granitblock och i 89 mm hål i pall i kalksten. Trycktidförloppen i sprängförsöken har mätts och beräknats. Mätuppställningen för fältförsök har utvecklats och förfinats. Förutom mätning av detonationshastighet, har LHM tekniken, som utvecklats på SveBeFo, använts för mätning av trycktidförloppet i spränghålet. Som underlag för simuleringarna har sprängämnets egenskaper mätts och en brinnmodell för sprängämnet tagits fram.

Försöken och simuleringarna har gett goda resultat. Resultaten visar att LHM tekniken fungerar bra. Det mätta trycket uppgick till 2,3 GPa i granitblocket och 5 GPa i kalkstenspallen och motsvarande varaktigheter på 745 respektive 96  $\mu$ s kunde registreras av tryckgivarna. Simuleringarna bekräftar delar av tryckmätningarna. Dock är en större datorkapacitet nödvändig för simulering av hela fältförsöken.

Rapporten beskriver tillverkning av sprängämne Emulsion 682 och mätning av dess egenskaper, framtagning av sprängämnets brinnmodell, utveckling av mätuppställning för tillämpning av LHM tekniken i fältförsök, sprängningsförsök i granitblock och i kalkstenspall, simulering av fältförsöken samt resultaten från alla arbetsmomenten.

I kommande projekt skall LHM-givarens konstruktion förbättras och dess responstid förkortas; SveBeFo:s simuleringskapaciteten utökas och sprängämnets reaktionsförlopp efter CJ-planet studeras med exempelvis cylinderexpansionsprov.

## Extended Summary

To control a blast and obtain the desired results requires knowledge of the detonation process in the explosive in the blast hole, i.e. knowledge of how the explosive energy is released and transferred to the rock. However, this knowledge is not readily accessible. Difficulties are encountered from both practical and theoretical aspects. The difficulties on the theoretical side are the lack of mathematical models which can accurately describe the rock and the explosive during blasting. Meanwhile, the difficulties on the practical side are the lack of measuring techniques to monitor the rapid, high-pressure and high-temperature detonation process in blast holes. For example, velocity of detonation (VOD) of the explosive and vibration in the surrounding rock have been the only parameters one can measure with good accuracy. No measurement of borehole pressure history in the bottom of a blast hole in rock has been presented in the literature.

The work in this report describes attempts and achievements from both theoretical and practical aspects. From the practical aspect, the LHM (Location-fixed Hydrodynamic Measuring-cup) technique developed at SveBeFo for measurement of the borehole pressure history has been applied in field blasting experiments in granite blocks and in a limestone bench. From the theoretical side, a burning model determined for the testing explosive has been implemented in the DYNA2D program to simulate the field experiments.

Three major research activities are included in this report; a) characterization of the research explosive, Emulsion 682, b) field blasting experiments in granite blocks and in a limestone bench and c) computer simulation of the field experiments with the program DYNA2D. Detailed studies serving these three major topics have been gathered in 10 appendices (Bilaga 1 through Bilaga 10), such as measurements of VODs and curvatures of the detonation fronts in different charge diameters, determination of the Hugoniot of the matrix of the explosive, determination of the equation of state (EOS) for the reacted respective unreacted explosive, determination of the burning model of the explosive, literature study on the pressure sensitivity of the carbon resistor used in the LHM gage and application of the LHM technique in the bench. This comprehensive summary will describe the major achievements with the help of some Figures and Tables in the report. Therefore, the numbering of the figures, tables and equations in this summary is identical to that in the report.

### 1. Characterization of the research explosive

A research explosive, Emulsion 682, has been manufactured according to the recipe in Table 1. It is an emulsion explosive based on ammonium nitrate and sodium nitrate and sensitized by glass microballoons. Characterization of this explosive has been carried out and the following properties have been determined.

- Density of the matrix at 20 °C: 1436 kg/m<sup>3</sup>
- Density of the matrix at 74 °C: 1400 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosity of the matrix at 74 °C: 49 kP or 49 Pa·s
- Density of the explosive at 20 °C:  $\rho_0 = 1169 \text{ kg/m}^3$
- VOD of the explosive in plastic tubes:

$$\text{VOD} = 6078 - 28888/\phi \quad (1)$$

- Curvature of the detonation front at the charge axis in plastic tubes:

$$R_0 = 15.89 + 0.84 \cdot \phi + 0.02 \cdot \phi^2 \quad (2)$$

- Shock Hugoniot of the matrix:

$$U_s = 2150 + 1.80 \cdot U_p \quad (3)$$

- Shock Hugoniot of the unreacted explosive:

$$U_s = 1538 + 1.666 \cdot U_p \quad (4)$$

- JWL EOS for the unreacted explosive:

$$P = 2.7019 \cdot 10^6 \cdot \left(1 - \frac{2.4189}{23.90V}\right) \cdot e^{-23.90V} - 20.901 \cdot \left(1 - \frac{1}{V}\right) \cdot e^{-2.4189V} + \frac{2.4189 \cdot E}{V} \quad (5)$$

At the ambient state:  $P_0 = \text{atmosphere pressure} \approx 0 \text{ GPa}$ ;  $V_0 = 1$  and  $E_0 = 0$

- JWL EOS for the reaction products:

$$P = 505.59 \cdot \left(1 - \frac{0.6817}{6.1157V}\right) \cdot e^{-6.1157V} + 14.77 \cdot \left(1 - \frac{0.6817}{2.1001V}\right) \cdot e^{-2.1001V} + \frac{0.6817 \cdot E}{V} \quad (6)$$

At the CJ-point:  $P_{\text{CJ}} = 10.24 \text{ GPa}$ ;  $v_{\text{CJ}} = 0.64877 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ;  $V_{\text{CJ}} = 0.7584$  and  $E_{\text{CJ}} = 4.8402 \text{ GJ/m}^3$

In Equations 1 through 6, VOD is the velocity of detonation (m/s);  $\phi$  is the charge diameter (mm);  $R_0$  is the curvature of the detonation front at the charge axis (mm);  $U_s$  is the shock wave velocity (m/s);  $U_p$  is the particle velocity (m/s);  $P$  is pressure (GPa);  $V$  is the relative volume ( $v/v_0$ );  $v$  is the specific volume ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $v_0$  is the specific volume at the atmosphere pressure ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) and  $E$  is the specific internal energy ( $\text{GJ/m}^3$ ).

- Ignition and Growth burning model for the explosive:

$$\frac{d\lambda}{dt} = 110(1 - 1.5\lambda)^2 (\mu_e - 0.05)^4 + 35(1 - \lambda)^{2/3} \lambda^{2/9} P^{1.84} \quad (7)$$

Here,  $\lambda$  is the reaction extent or the fraction of the reacted explosive;  $t$  is time ( $\mu\text{s}$ );  $\mu_c$  is the relative compression of the explosive ( $\rho_c/\rho_0 - 1$ );  $\rho_c$  is the density of the reacting explosive ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_0$  is the initial density of the explosive ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) and  $P$  is pressure (Mbar)

## 2. The LHM gage for measurement of borehole pressure history

The configuration and dimensions of the LHM gage is illustrated in Figure 5. It consists of a steel cup filled with water. A 470  $\Omega$  carbon resistor is mounted at the bottom of the cup as the pressure sensor. The pressure sensitivity for this resistor is expressed by Equations 8a and 8b. Further descriptions of the pressure sensitivity are given in Appendix 7 (Bilaga 7).

$$P = 0.4075 \cdot (R_0/R - 1)^{0.8734} \quad (R/R_0 \geq 0.44) \quad (8a)$$

$$P = 7.001 - 4.345 \cdot \frac{R}{R_0} + 0.364 \cdot \frac{R_0}{R} - 8.40 \cdot e^{-R/R_0} \quad (R/R_0 < 0.44) \quad (8b)$$

Here:  $P$  is pressure (GPa);  $R$  is the resistance under pressure ( $\Omega$ ) and  $R_0$  is the resistance at atmosphere pressure ( $\approx 470 \Omega$ ).

## 3. Field tests in granite blocks

Two test shots have been fired in granite blocks, one with a decoupled charge and the other without decoupling. The test configuration can be seen in Figure 6 and the details are given in Table 2. The LHM gage was located at the bottom of the blast hole and the explosive is placed on top of it. The signal cable from the LHM gage was connected to an amplifier through a cable hole drilled beneath the LHM gage. Bottom initiation by a primer was used and the VOD in the charge was measured.

Table 2: Test configurations for field tests in granite blocks.

Test No.	Test 1	Test 2
Block size	Length x Width: 2.2 m x 2.0 m Height: 1.33 m	Length x Width: 1.5 m x 1.5 m Height: 1.05 m
Blast hole	$\phi$ 37 mm and 0.6 m in length	$\phi$ 37 mm and 0.6 m in length
Cable hole	$\phi$ 25 mm and 0.73 m in length	$\phi$ 25 mm and 0,45 m in length
Charge	Fully charged with Emulsion 682 Diameter: 37 mm Length: 35.5 cm	Decoupled with Emulsion 682 Diameter: 21.2 mm Length: 28 cm
Primer	RDX cylinder, $\phi$ 21 x 20 mm, 12 g	RDX cylinder, $\phi$ 21 x 20 mm, 12 g
Detonator	No. 8, electric	No. 8, electric

The measured pressure histories in the blast holes were shown in Figure 7 and the measured VODs in Figure 8. A summary of the measuring results were also given in Table 3. Photos of the blocks and the LHM gages before respective after the blast tests were collected in Appendix 8 (Bilaga 8), Figure B13 for the fully charged block and Figure B14 for the decoupled block.

Table 3: Results from field experiments in granite blocks.

Test No.	Test 1	Test 2
VOD	5712 m/s	4756 m/s
Pressure history	Max. pressure: 2.3 GPa	Max. pressure: 0.55 GPa
	Recorded duration: 0.51 ms	Recorded duration: 0.75 ms

The short pressure duration recorded in the fully charged hole was caused by the breakage of the signal cable from the LHM gage.

#### 4. Field test in a limestone bench

The LHM technique has been applied to a bench blasting in a limestone quarry. The final test configuration in Figure 9 has been developed after a series of field experiments, described in Appendix 9 (Bilaga 9). An inclined  $\phi$  89 mm blast hole was drill through the bench. Two LHM gages were mounted in the bottom part of the hole by casting in cement. An 0.8 m long charge of Emulsion 682 was placed on top of the gages and the hole was stemmed. The explosive was initiated by a bottom primer of 50 g pressed Pentolite. Borehole pressure, VOD in the explosive and vibrations in the rock behind the charge were measured.

The measuring results of VOD, borehole pressure and vibrations were shown in Figures 10, 11, 12 and 18. The VOD was evaluated as 5453 m/s, see Figure 10 and the vibration level in the rock was generally very high, see Figure 18. However, it was difficult to determine the highest measured pressures from the records, since some high frequency signals were superimposed on the initial parts of the pressure records, see Figures 11 and 12. Ignoring these high frequencies, the maximum pressure was estimated to be 5 to 6 GPa. The recorded pressure duration was very short, 96  $\mu$ s from one gage and 50  $\mu$ s from the other gage. Again, the breakage of the signal cable terminated the pressure records.

#### 5. Computer simulation of the field tests

It had been planned to simulate all the field tests described in Sections 3 and 4 by the DYNA2D program implemented with the burning model of Emulsion 682. However, it soon turned out that our computing capacity was too limited to simulate the field test in the limestone quarry. Nor could we simulate the test in the granite block with a decoupled charge. Even for the test in the granite block with a fully charged hole, our

computing capacity was so limited that we could only carry out qualitative studies. Still, several important results have been obtained from the simulations.

- The wave propagation inside the steel cup of the LHM gage could be studied in detail. Agreement between the simulation and the measurement was excellent in terms of arrival times of various waves, e.g. reflections and wave collisions.
- The size of the stone block determines the pressure duration in the borehole.
- The dynamic yield strength of the rock determines the pressure amplitude.
- The response time of the LHM gage is quite long. That is to say that it takes a long time before the pressure inside the LHM cup corresponds to the pressure in the detonation gases in the blast hole. This response time can be shortened by some simple improvements.
- The calculated VOD by the simulation agrees well with the measured one.

In the coming projects, the construction of the LHM gage will be improved so that its response time will be shorter; our computation capacity will be increased and the reaction in the explosive after the CJ point will be studied by cylinder tests.



<b>Innehållsförteckning</b>	<b>Sida</b>
<b>Förord</b>	i
<b>Sammanfattning</b>	ii
<b>Extended Summary</b>	iii
<b>Innehållsförteckning</b>	ix
<b>Inledning</b>	1
<b>2 Egenskaper hos forskningsprämgämnet</b>	2
2.1 Sprängämnetts recept	2
2.2 Bestämning av sprängämnetts fysiska och detonationsegenskaper	2
<b>3 Fältmätning av sprängämnetts expansionsarbete i borrhål</b>	8
3.1 Tryckgivare för mätning av borrhålstryck och givarkalibrering	8
3.2 Fältmätningar i granitblock	10
3.3 Fältmätning i kalkstenspall	15
<b>4 Simulering av sprängämnetts expansionsarbete i borrhål</b>	26
4.1 Materialdata till simuleringarna	26
4.2 Inledande simuleringar	28
4.3 Simulering av sprängämnetts expansionsförlopp i ett fulladdat hål i granitblock	29
<b>5 Slutsatser och diskussioner</b>	39
<b>Erkännande</b>	42
<b>Referenser</b>	43
<b>Bilaga 1: Mätning av VOD i sprängämne Emulsion 682</b>	45
<b>Bilaga 2: Mätning av krökningsradier hos detonationsfronter i sprängämne Emulsion 682</b>	49
<b>Bilaga 3: Tillståndsekvation för oreagerat sprängämne</b>	53
<b>Bilaga 4: Tillståndsekvation för spränggaser</b>	56
<b>Bilaga 5: JWJ anpassningsprogram JWJ</b>	58
<b>Bilaga 6: Brinnmodell för sprängämne Emulsion 682</b>	63
<b>Bilaga 7: Tryckkänslighet hos 470 Ω:s kolmotstånd - litteraturstudie av givarekalibrering</b>	68
<b>Bilaga 8: Utseende hos granitblocken och tryckgivarna före och efter sprängförsöken</b>	72
<b>Bilaga 9: Användning av LHM-givaren i tryckmätning i dagbrott</b>	74
<b>Bilaga 10: Pallen i kalkstensbrottet före och efter sprängförsöket</b>	85
<b>Referenser i bilagor</b>	86

## 1 Inledning

Det är varje bergsprängares önskan att kunna utnyttja sprängämnet effektivt genom att anpassa sprängämne och laddteknik till den avsedda tillämpningen. Sprängning skall åstadkomma önskad fragmentering, minimala skador på kvarstående berg och minimala föroreningar av miljön i form av spränggaser och sprängämnerester. För att kunna uppfylla denna önskan måste man förstå dels sprängämnens detonationsegenskaper, dels bergs beteende under sprängning och dessutom samverkan mellan sprängämne och berg. Emellertid är det ingen enkel uppgift att kunna förstå dessa.

För det första är sprängämnen som används i bergsprängning oftast så kallat icke-ideala sprängämnen. Deras detonationsegenskaper är starkt beroende av inverkan från omgivningen, t ex den bergart man spränger i. Den traditionella detonationsteorin kan inte beskriva sprängförloppet med tillräcklig noggrannhet. Under de senaste åren har ett antal brinnmodeller utvecklats för dessa icke-ideala sprängämnen på bl a SveBeFo /1, 2, 3, 4 och 5/. För det andra är berget allmänt känt för sin komplexitet. Fysiska egenskaper och geologi varierar från plats till plats. Onekligen medför tillämpningen av icke-ideala sprängämnen i komplicerat berg stora praktiska och teoretiska svårigheter.

På den teoretiska sidan ligger svårigheten i att finna matematiska modeller som noggrant beskriver berg respektive sprängämne under sprängningsförloppet. På den praktiska sidan ligger svårigheten i mätteknik för uppföljning av det snabba sprängningsförloppet i berg med stora tryck och höga temperaturer. Detonationshastigheten (VOD) hos sprängämnet och vibrationerna i berget har varit de enda parametrar som kunnat mätas med god noggrannhet. Utrustningar för sådana mätningar är kommersiellt tillgängliga. Vad vi vet har ingen lyckats mäta trycktidförloppet i botten av ett fulladdat sprängborrhål. Dock har försök att mäta borrhålstryck i berg utförts så tidigt som på 60 talet /6/. Försök att mäta borrhålstryck i borrhål med frikopplade laddningar har också utförts /7/ men den tekniken har inte används i praktiken sedan dess. Dessutom har mätning av detonationstrycket i borrhål utförts /8/.

SveBeFo har tidigare bedrivit forskning på såväl teoretisk beräkning som mätteknik för fältbruk. Bland annat har en metodik att bestämma brinnmodell för sprängämnen och en metod, den s k LHM (Lägesbestämd Hydrostatisk Mätkopp) metoden, för mätning av borrhålstryck i hålbotten utvecklats /5, 9 och 10/.

I nuvarande projekt har ett emulsionsprängämne, Emulsion 682, tillverkats och använts i fältförsök i stenblock och i pallsprängning. Borrhålstryck och VOD har mätts i försöken. Sprängningarna har dessutom simulerats med hjälp av programmet Dyna2D med brinnmodellsdata och andra materialegenskaper som tagits fram för sprängämnet.

Flera personer har varit delaktiga i projektet och deras insatser redovisas i Erkännande vid slutet av rapporten.

## 2 Egenskaper hos forskningsprängämnet

Ett emulsionssprängämne, Emulsion 682, har tillverkats för forskningsändamål i Dyno Nobel:s laboratorium i Gytterp. Sprängämnets fysikaliska egenskaper och detonationsegenskaper har bestämts genom laboratorieförsök. Brinnmodellparametrarna har bestämts genom den tidigare utvecklade metodik /5/ som innebär s k baklängsräkningar mot mätdata.

### 2.1 Sprängämnets recept

Receptet finns i Tabell 1. Följande hänsyn har tagits till valet av komponenter och dess komposition: 1) Sprängämnet skall vara stabilt och klara en lagringstid på minst 2 år. Detta krav ledde till en stabil matris med AN/SN saltlösning och ett stabilt emulgeringsmedel samt glasmikroballonger som medel för känsliggöring. 2) Sprängämnet skall vara syrebalanserat.

Tabell 1: Receptet på forskningsprängämne Emulsion 682.

Komponent	Ingrediens	Komposition (vikt-%)
Saltlösning	Vatten	14,52
	Natrium Nitrat (SN)	10,88
	Ammonium Nitrat (AN)	65,31
Emulgator	LZ 5691D <sup>1)</sup>	1,50
Olja	Whitrex 309 <sup>2)</sup>	4,51
Mikroballong	3M K20 <sup>3)</sup>	3,28

<sup>1)</sup>: Uppgifter från tillverkaren Lubrizol Limited: kemisk formel =  $C_{6,8}H_{13,9}N_{0,5}O_2$ , densitet vid 15,6 °C = 916 kg/m<sup>3</sup> och bildningsvärme vid vätskefas = -2500 kJ/kg.

<sup>2)</sup>: Enligt tillverkaren Mobil Oil HB: densitet vid 20 °C = 850 kg/m<sup>3</sup> och förbränningsvärme = 45,6 MJ/kg.

<sup>3)</sup>: Tillverkare: 3M Co.

### 2.2 Bestämning av sprängämnets fysiska och detonationsegenskaper

#### 2.2.1 Fysikaliska egenskaper

Under sprängämnets tillverkning har densitet och viskositet hos matrisen mätts. Densiteten hos matrisen och sprängämnet har dessutom mätts vid rumstemperatur.

Densitet hos matrisen vid 20 °C = 1436 kg/m<sup>3</sup>

Densitet hos matrisen vid 74 °C = 1400 kg/m<sup>3</sup>

Densitet hos sprängämne vid 20 °C = 1169 kg/m<sup>3</sup>

Viskositet hos matrisen vid 74 °C = 49 kcP = 49 Pa·s

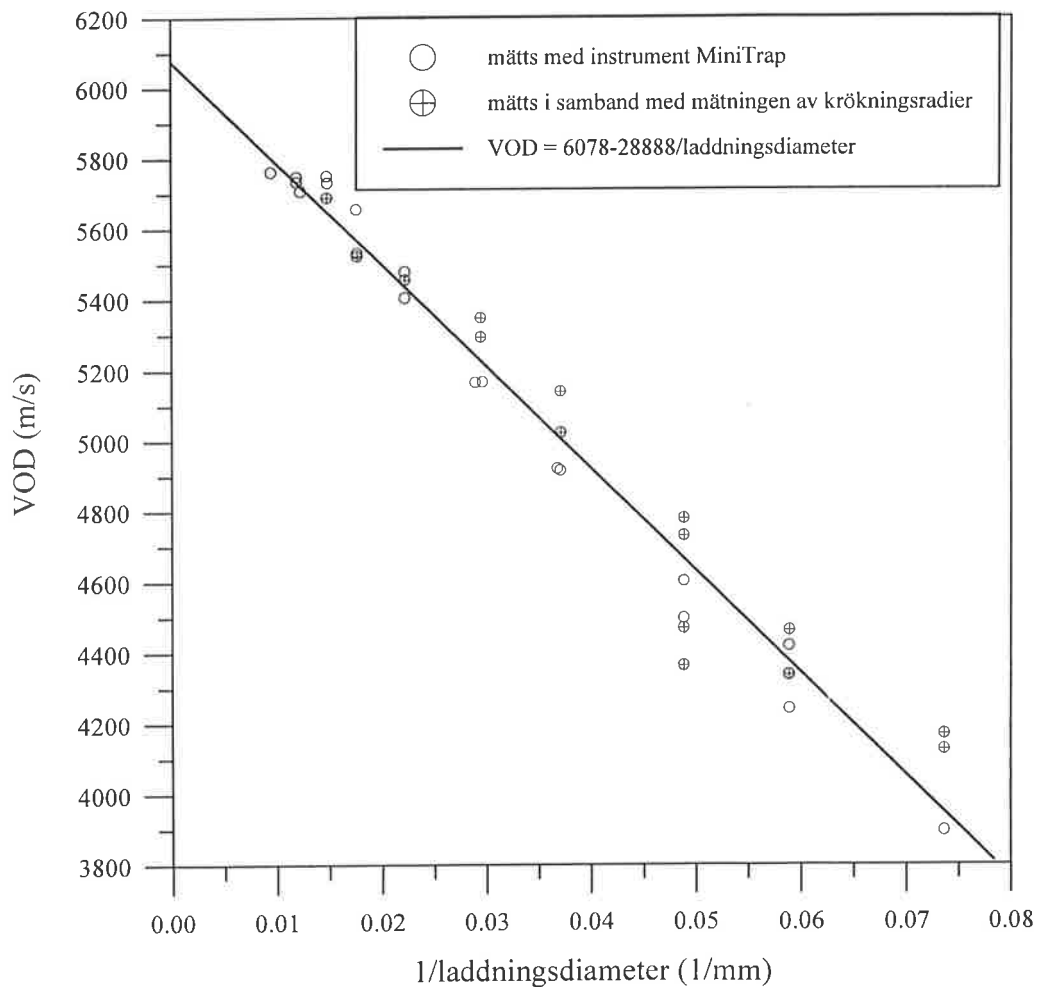
### 2.2.2 Detonationshastighet (VOD)

VOD hos Emulsion 682 har mätts både i rörladdningar och i borrhål i berg. Rören bestod av PVC och stål. Tjockleken på PVC-rören varierade mellan 1,2 mm och 4,5 mm beroende på laddningsdiametern medan tjockleken på stålrör var 3,6 mm. Sammanlagt har 35 VOD mätningar erhållits i PVC-rörladdningar, en mätning i stålrörladdning, två i granitblock och en i kalkstenspall.

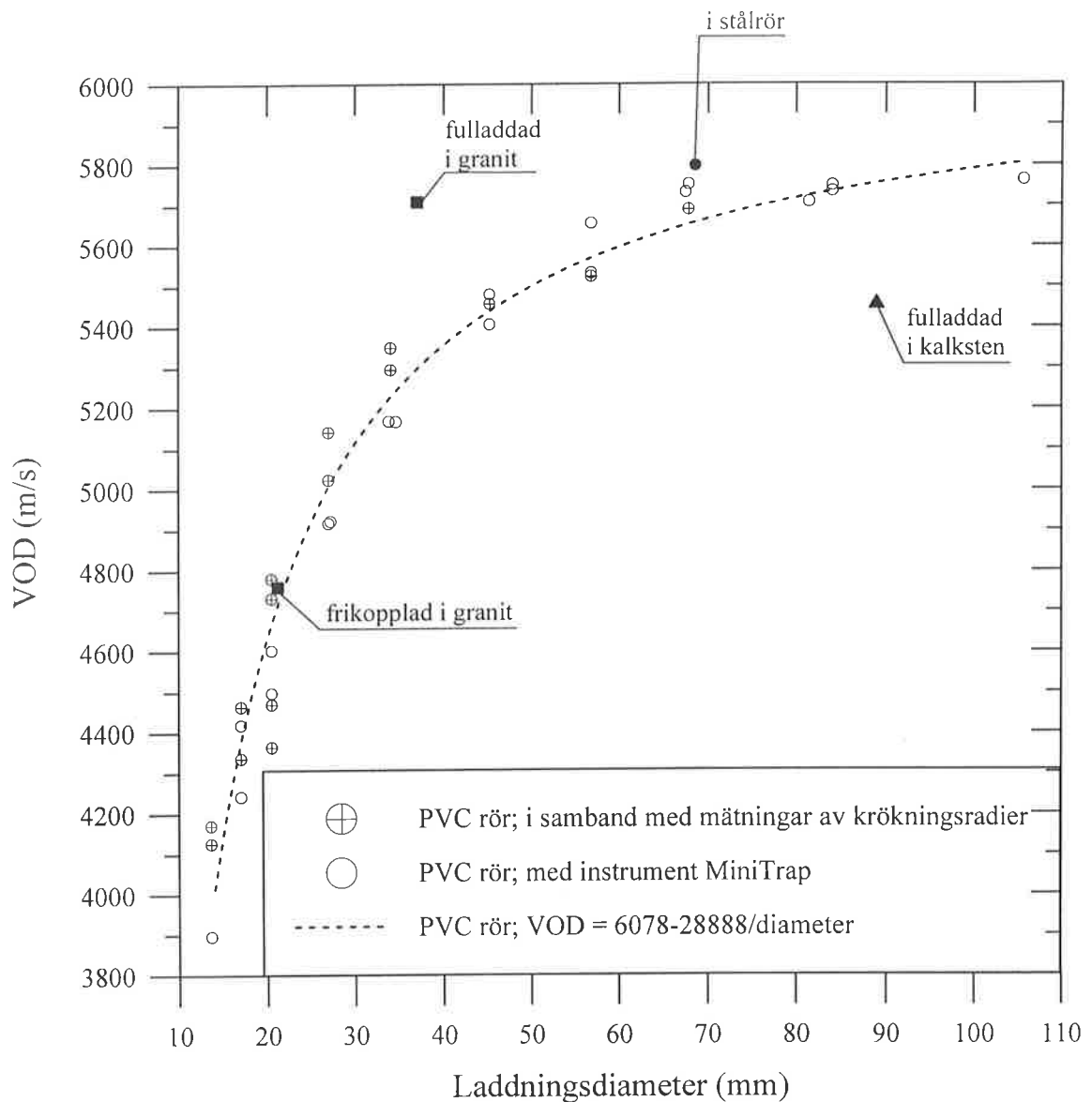
Diagram över VOD som en funktion av laddningsdiameter för mätningarna i PVC-rör visas i Figur 1. Sambandet kan beskrivas med ekvation 1. I Figur 2 ingår samtliga VOD mätningar. Mer information angående mättekniken och mätresultaten finns i Bilaga 1.

$$\text{VOD} = 6078 - 28888/\phi \quad (1)$$

Här är: VOD = detonationshastigheten (m/s)  
 $\phi$  = laddningsdiametern (mm)



Figur 1: VOD mätningar i sprängämne Emulsion 682 laddade i PVC-rör.



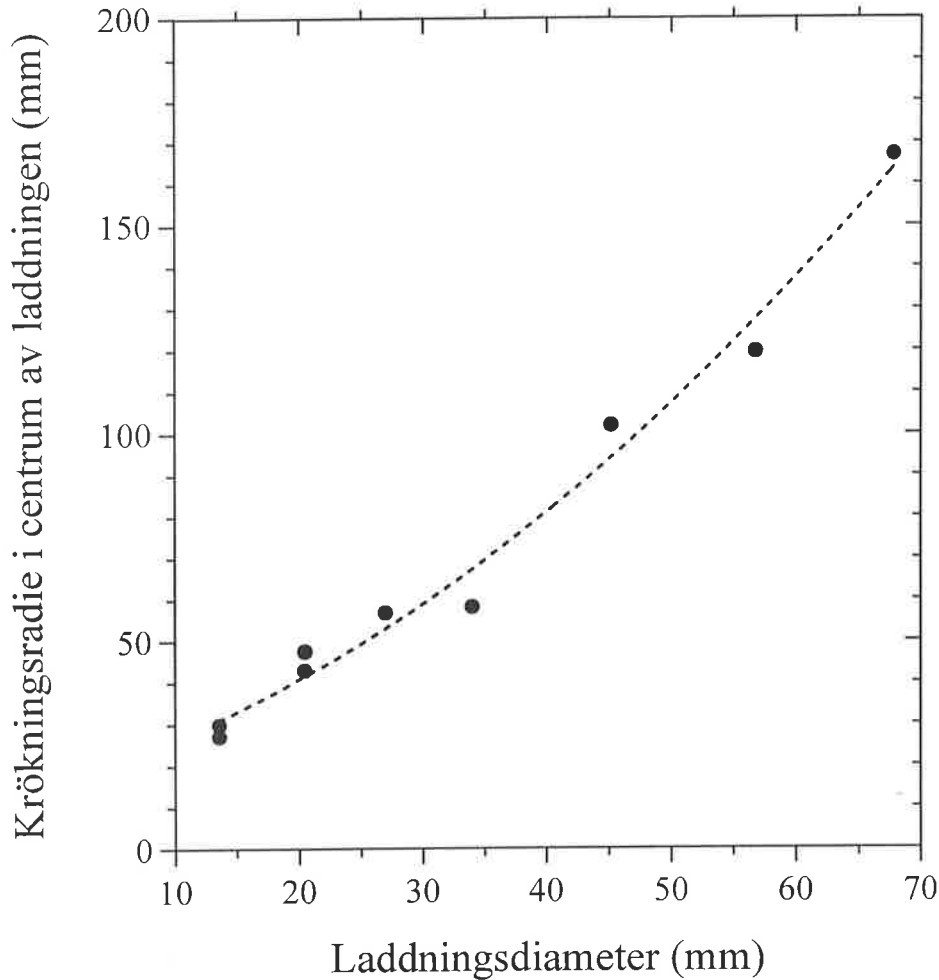
Figur 2: VOD hos sprängämne Emulsion 682 i PVC-rör, i stålrör, i borrhål i granit block och i borrhål i kalkstensdagbrott.

### 2.2.3 Krökningsradien hos detonationsfronten i sprängämne Emulsion 682

Detonationsfronter i 14 PVC-rörladdningar med laddningsdiameter mellan 13,6 och 67,8 mm har fotograferats med vår Cordin 116 höghastighetskamera. Krökningsradien hos detonationsfronterna på laddningarnas axel har mätts och redovisas som en funktion av laddningsdiametern i Figur 3. Förhållandet mellan krökningsradie och laddningsdiameter kan beskrivas med ekvation 2. Mer detaljer om mätproceduren och mätresultatet redovisas i Bilaga 2.

$$R_0 = 15,89 + 0,84 \cdot \phi + 0,02 \cdot \phi^2 \quad (2)$$

Här är:  $R_0$  = krökningsradien hos detonationsfronten mätt i centrum av laddningen (mm)  
 $\phi$  = laddningsdiameter (mm)



Figur 3: Detonationsfrontens krökningsradie i centrum av laddningen som funktion av laddningsdiametern.

#### 2.2.4 Tillståndsekvationen för oreagerat sprängämne Emulsion 682

Tillståndsekvationen för oreagerad Emulsion 682 har bestämts i tre steg. Först har Hugoniot-sambandet för matrisen bestämts experimentellt. Sedan beräknades Hugoniot-sambandet för det oreagerade sprängämnet med hjälp av blandningsregler för den blandning av matris och mikrobullor som motsvarar sprängämnets komposition. Till sist beräknades tillståndsekvationen för det oreagerade sprängämnet baserat på dess Hugoniot. Tillståndsekvationen skall dessutom anpassas till JWV-form för användning i DYNA2D.

Försöksmetodikerna och resultaten beskrivs i Bilaga 3.

Ekvationerna 3 och 4 utgör Hugoniot-sambanden för matrisen respektive oreagerat sprängämne Emulsion 682. Ekvation 5 är däremot tillståndsekvationen för oreagerat sprängämne Emulsion 682 uttryckt i JWL-form.

$$U_s = 2150 + 1,80 \cdot U_p \quad (3)$$

$$U_s = 1538 + 1,666 \cdot U_p \quad (4)$$

$$P = 2,7019 \cdot 10^6 \cdot \left(1 - \frac{2,4189}{23,90V}\right) \cdot e^{-23,90V} - 20,901 \cdot \left(1 - \frac{1}{V}\right) \cdot e^{-2,4189V} + \frac{2,4189 \cdot E}{V} \quad (5)$$

Här är:  $U_s$  = stötvågens hastighet genom materialet (m/s)

$U_p$  = partikelhastigheten i materialet, orsakad av stötvågen (m/s)

$P$  = trycket i oreagerat sprängämne (GPa)

$V = v/v_0$

$v$  = specifik volym hos oreagerat sprängämne ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$v_0$  = specifik volym hos oreagerat sprängämne vid atmosfärstryck

=  $0,855 \cdot 10^{-3}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$E$  = specifik inre energi hos oreagerat sprängämne ( $\text{GJ}/\text{m}^3$ )

Vid starttillståndet gäller:

$P_0$  = atmosfärstryck  $\approx 0$  GPa

$V_0 = 1$

$E_0 = 0$

### 2.2.5 Tillståndsekvationen för spränggasen från sprängämne Emulsion 682

Såväl spränggasernas tillstånd vid en fullständig detonation som gasernas expansionsentropi har beräknats med ett termodynamiskt program Cheetah /11/. Expansionsentropin har sedan anpassats till JWL-form, ekvation 6. Detaljer om Cheetahberäkningen och JWL-anpassningen beskrivs i Bilaga 4.

$$P = 505,59 \cdot \left(1 - \frac{0,6817}{6,1157V}\right) \cdot e^{-6,1157V} + 14,77 \cdot \left(1 - \frac{0,6817}{2,1001V}\right) \cdot e^{-2,1001V} + \frac{0,6817 \cdot E}{V} \quad (6)$$

Här är:  $P$  = trycket i spränggasen (GPa)

$V = v/v_0$

$v$  = specifik volym hos spränggasen ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$v_0$  = specifik volym hos oreagerat sprängämne vid atmosfärstryck

=  $0,855 \cdot 10^{-3}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$E$  = specifik inre energi hos spränggasen ( $\text{GJ}/\text{m}^3$ )

Vid CJ tillståndet gäller:

$$\begin{aligned} P_{CJ} &= 10,24 \text{ GPa} \\ v_{CJ} &= 0,649 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \\ V_{CJ} &= 0,7584 \\ E_{CJ} &= 4,8402 \text{ GJ/m}^3 \end{aligned}$$

## 2.2.6 En brinnmodell för sprängämnet

### Bestämning av brinnmodellparametrar

En två-terms brinnmodell av typen "Ignition and Growth" /5/ har använts för beskrivning av förbränningshastigheten hos Emulsion 682. Parametervärdena till brinnmodellen har kalibrerats med hjälp av programmet DYNA2D genom minimering av avvikelserna mellan DYNA2D-beräkningar och mätningarna av både VOD och krökningsradier. Indata till DYNA2D-beräkningen är JWL-tillståndsekvationerna för reagerat sprängämne och för spränggaser samt sprängämnets densitet. Ett kalibreringsschema visas i Figur 4 och den framtagna brinnmodellen för Emulsion 682 ges i ekvation 7. Observera att enheterna i ekvation 7 är anpassade till användning i DYNA2D. En utförligare beskrivning av parameterbestämningen finns i Bilaga 6.

$$\frac{d\lambda}{dt} = 110(1 - 1,5\lambda)^2 (\mu_e - 0,05)^4 + 35(1 - \lambda)^{2/3} \lambda^{2/9} P^{1,84} \quad (7)$$

här är:  $\lambda$  = reaktionsgraden = den fraktion av sprängämnet som har reagerat

$t$  = tiden ( $\mu\text{s}$ )

$\mu_e$  = relativa kompressionen av sprängämnet =  $\rho_e/\rho_0 - 1$

$\rho_e$  = densiteten hos det reagerande sprängämnet ( $\text{g/cm}^3$ )

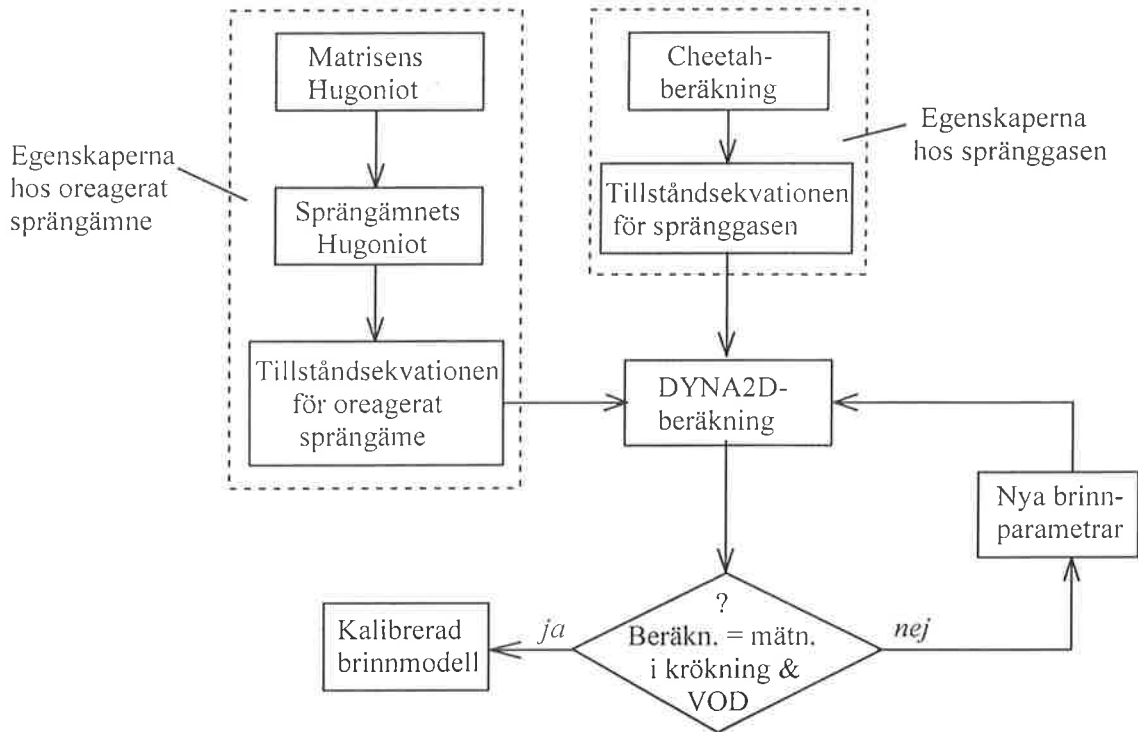
$\rho_0$  = startdensiteten hos sprängämnet ( $\text{g/cm}^3$ )

$P$  = trycket (Mbar)

### Verifiering av brinnmodellen

För att verifiera brinnmodellens giltighet har brinnmodellen använts i en simulering av det sprängningsförsök i stålrör som beskrevs i Bilaga 1, se Tabell B1 b) och redovisning i Figur B1 a). I försöket har VOD hos sprängämne Emulsion 682 uppmätts till 5798 m/s. Simuleringen gav ett VOD-värde på 5113 m/s, vilket överensstämmer mycket bra med försöket. Detta visar att modellen duger bra åtminstone för beskrivning av stabila detonationer.





Figur 4: Flödesschema för kalibrering/parameterisering av brinnmodell.

### 3 Fältmätning av sprängämnes expansionsarbete i borrhål

#### 3.1 Tryckgivare för mätning av borrhålstryck och givarkalibrering

Fältförsöken har som målsättning att mäta ett sprängämnes expansionsarbete i borrhål. Mätresultaten är dessutom underlagsmaterial till verifikation av simuleringsresultat när den framtagna brinnmodellen tillämpas i bergsprängning. VOD är fortfarande den enda detonationsegenskap hos ett sprängämne man kan mäta med god noggrannhet i fält. Metoderna är beprövade och det finns olika kommersiella mätutrustningar för detta ändamål.

Borrhålstrycket eller rättare sagt trycktidsförloppet i sprängborrhål är ett mått på sprängämnets expansionsarbete i borrhål. Det ger mycket mer information om sprängämnets funktion och om samspelet mellan sprängämnet och berget än VOD, särskilt för icke-ideala sprängämnen som civila sprängämnen. Men det är också betydligt svårare att mäta. Enstaka försök med borrhålstrycksmätning har förekommit /6, 7/. Nu är LHM (Lägesbestämd Hydrostatisk Mätkoppen) metoden /9/ tillgänglig och tekniken har använts med goda resultat i tidigare försök i granitblock /10/. Därför har LHM-metod använts i fältförsöken för mätning av borrhålstrycket samtidigt med VOD mätningar.

LHM-givarens konstruktion har beskrivits tidigare /9, 10/ men illustreras i Figur 5 med de viktigaste måtten. Sensorn, ett kolmotstånd, har använts av många forskare för

tryckmätning och den har kalibrerats i många olika sammanhang. En litteraturstudie om kolmotståndens användning och kalibrering har därför utförts. Resultatet redovisas i Bilaga 7. Utifrån litteraturstudien bedöms att tryckkänsligheten för den typ av kolmotstånd som används i LHM-givaren uttrycks bäst av ekvation 8. Ekvation 8a är Perssons /9/ kalibrering under statiskt tryck och ekvation 8b är den dynamiska kalibreringen av Ginsberg och Asays /12/. Ekvationerna 8a och 8b har använts för konvertering av givarsignalerna från fältförsöken till trycktidförlopp.

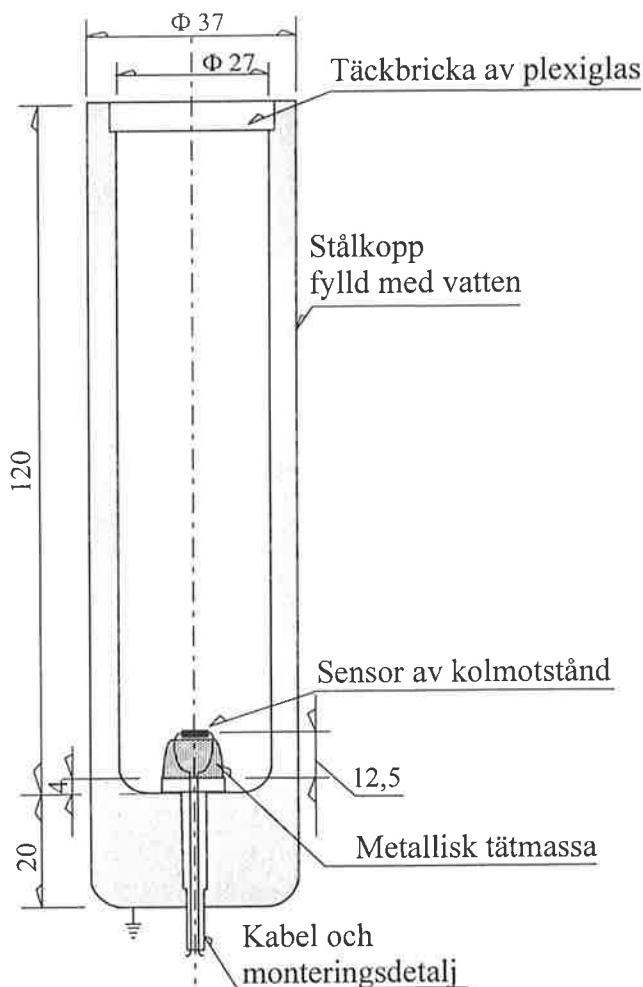
$$P = 0,4075 \cdot (R_0/R - 1)^{0,8734} \quad (R/R_0 \geq 0,44) \quad (8a)$$

$$P = 7,001 - 4,345 \cdot \frac{R}{R_0} + 0,364 \cdot \frac{R_0}{R} - 8,40 \cdot e^{-R/R_0} \quad (R/R_0 < 0,44) \quad (8b)$$

Här är: P = tryck (GPa)

R = motstånd under trycksättning ( $\Omega$ )

R<sub>0</sub> = motstånd vid atmosfärstryck ( $\Omega$ )  $\approx 470 \Omega$



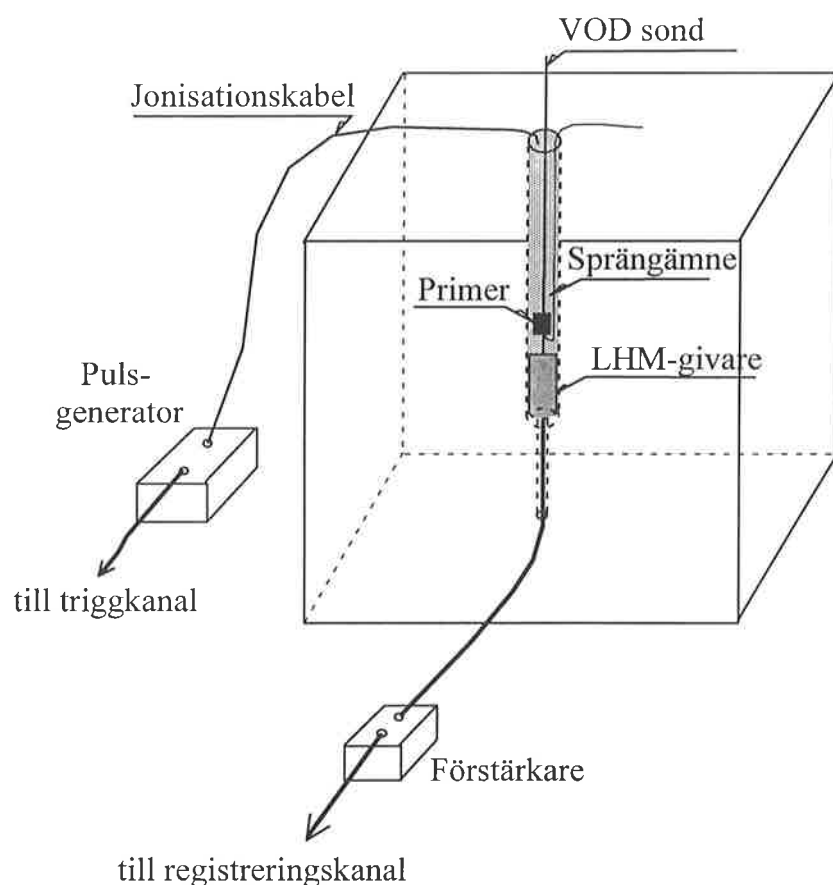
Figur 5: LHM tryckgivare för mätning av borrhålstryck

### 3.2 Fältmätningar i granitblock

#### 3.2.1 Försöksutförande

Försöksförfarandet är snarlikt den tidigare försöksserien /10/. Försöksplatsen är också den samma dvs Svenneby stenbrott nära Norrköping som drivs av Göinge Stenförädling AB. I nedanstående beskrivning redovisas ändå alla viktiga detaljer.

Figur 6 visar försöksuppställningen. Blocken var av homogen granit utan synliga sprickor eller svaghetsplan. Sprängborrhålen var ca 37 mm i diameter (borrades med en sliten 38 mm krona) och kabelhålen  $\phi$  25 mm. LHM-givaren var fastgjuten i sprängborrhålets botten med ett epoxilikt injekteringsmedel.



Figur 6: Mätning av borrhålstrycket i granitblock.

Botteninitiering användes och på så sätt kunde VOD hos laddningen mätas. För VOD-mätningen har ett MiniTrap instrument tillverkat av MREL i Kanada använts. Mätsonden är en så kallad VOD probe, dvs en 0,9 m lång smal men styv motståndspinne med ett jämnt fördelat motstånd på  $322,5 \Omega/m$ . För registrering av

signalen från tryckgivaren användes ett LeCroy 7200 digital-oscilloskop och en jonisationspuls i slutet av laddningen användes som triggpuls för registreringen.

Två försök har utförts, ett med fulladdat sprängborrhål och ett med frikopplad laddning. Försöksuppställningen redovisas i Tabell 2.

Tabell 2: Försöksuppställningar för sprängförsöken i granitblock.

Försöksnr	Försök 1	Försök 2
Blocks-dimensioner	Bredd: 2,2 m Djup: 2,0 m Höjd: 1,33 m	Bredd: 1,5 m Djup: 1,5 m Höjd: 1,05 m
Borrhål	Sprängborrhål: $\phi$ 37 mm och 0,6 m långt Kabelhål: $\phi$ 25 mm och 0,73 m långt	Sprängborrhål: $\phi$ 37 mm och 0,6 m långt Kabelhål: $\phi$ 25 mm och 0,45 m långt
Laddning	Emulsion 682 Fulladdat hål Laddningsdiameter: 37 mm Laddningslängd: 35,5 cm *	Emulsion 682 Frikopplad laddning Laddningsdiameter: 21,2 mm Laddningslängd: 28 cm *
Primer	RDX kuts, $\phi$ 21 x 20 mm, 12 g Avståndet mellan primern och LHM-givarens överända: 3 cm	RDX kuts, $\phi$ 21 x 20 mm, 12 g Avståndet mellan primern och LHM-givarens överända: 4 cm
Kapsel	VA	VA

\*: Den planerade laddningslängden var 0,5 m och sprängborrhålsdiametern 38 mm. Eftersom hålet är borrarat med en sliten krona och håldiametern blev 37 mm, fastnade LHM koppen en bit ovanför hålbotten och laddningslängden blev därför kortare.

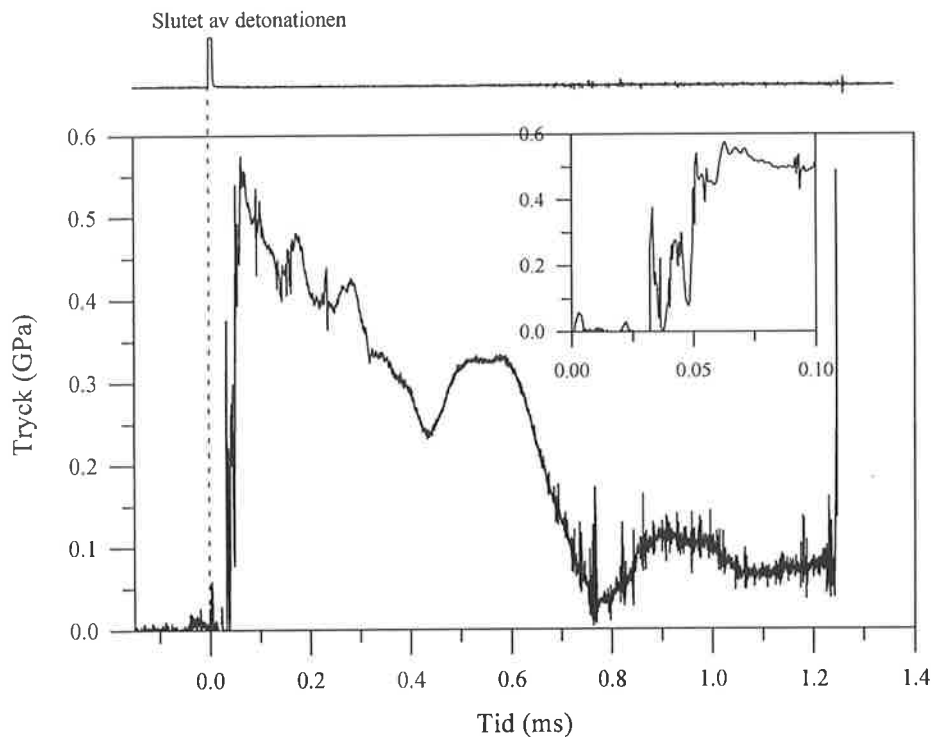
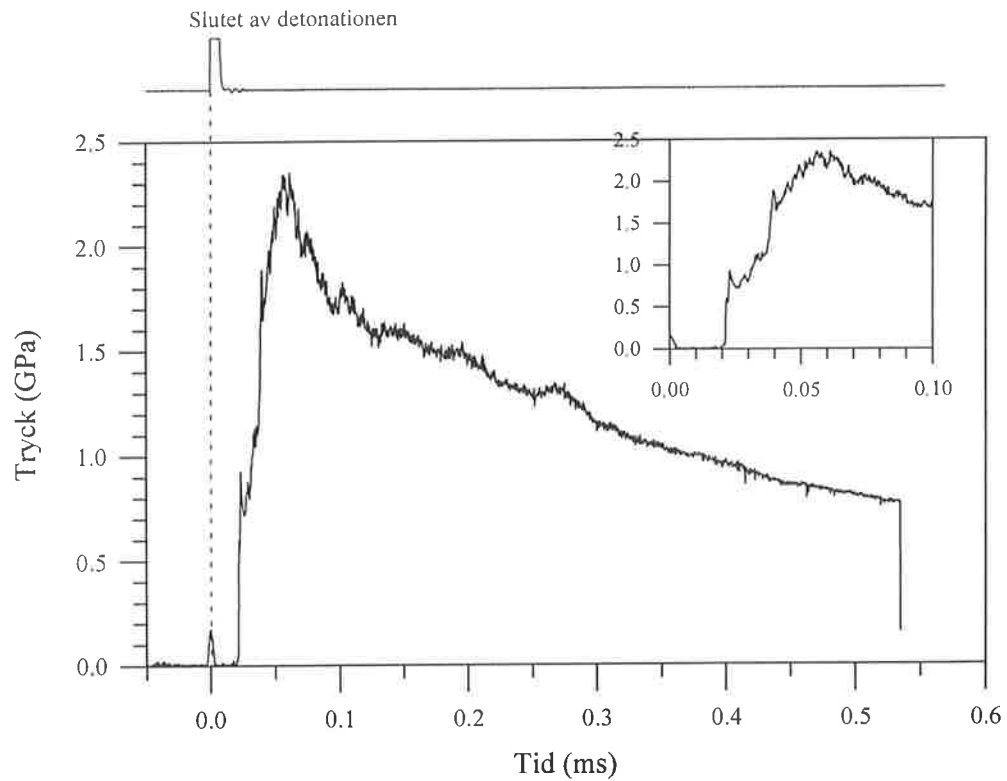
### 3.2.2 Resultat från blockförsöken

Resultaten från tryck- och VOD-mätningarna i blockförsöken sammanfattas i Tabell 3. Respektive registreringar plottas i Figurer 7 och 8. Dessutom har blockens och givarnas utseende före och efter sprängförsöken avbildats i Bilaga 8.

Tabell 3: Mätresultatet från sprängförsöken i granitblock.

Försöksnr	Försök 1	Försök 2
VOD	5712 m/s	4756 m/s
Tryck	Max. tryck: 2,3 GPa	Max. tryck: 0,55 GPa
	Registrerad varaktighet: 0,514 ms	Registrerad varaktighet: 0,745 ms*
	Tid mellan 1:a och 2:a språnget: 16 $\mu$ s	Tid mellan 1:a och 2:a språnget: 30,8 $\mu$ s
	Tid från 1:a språnget till max. tryck: 34,4 $\mu$ s	Tid från 1:a språnget till max. tryck: 43,2 $\mu$ s

\*: Den synliga signallängden, se Figur 7, är 1,222 ms. Men efter 0,745 ms har trycket sjunkit nära till 0 och de signalerna efter denna tidpunkt kan tolkas som brus som fångats upp av kabeln.

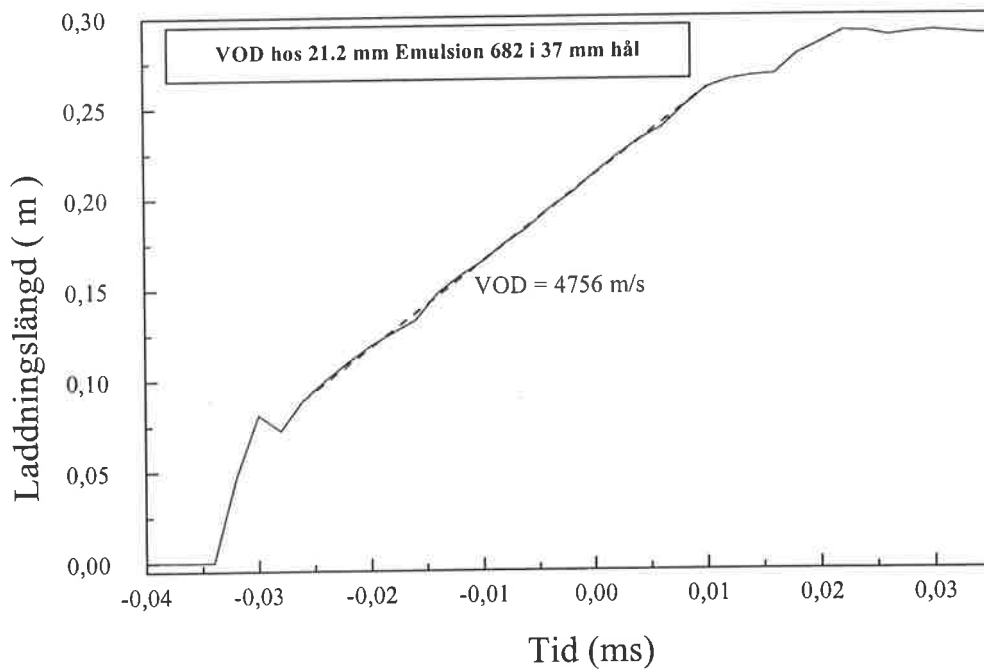
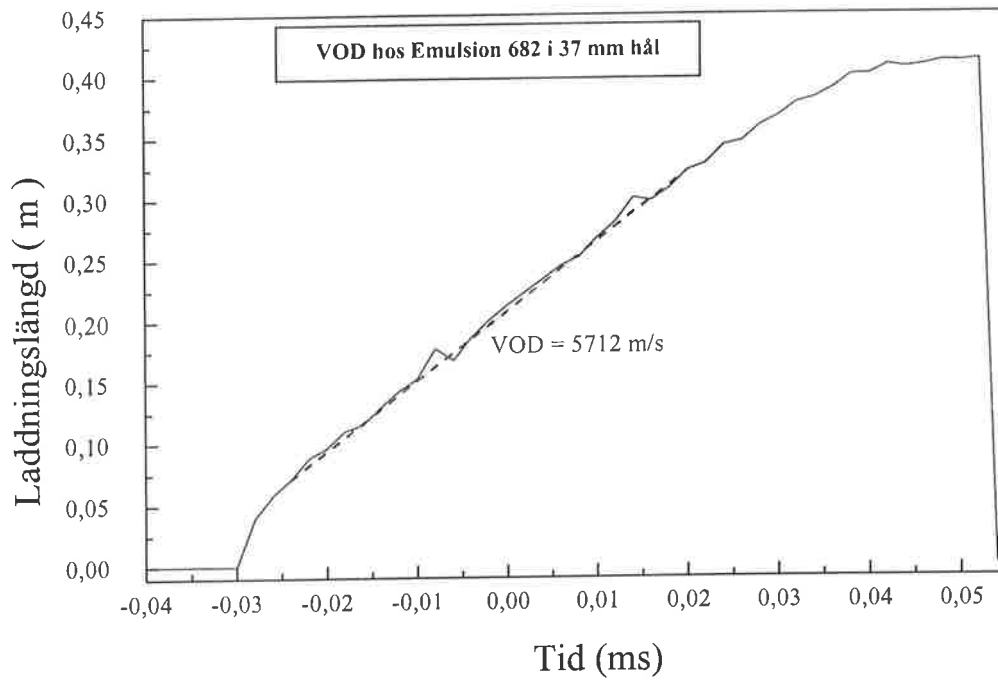


Figur 7: Trycktidförlopp från sprängförsöken i granitblock.

Ovan: Försök 1 med fulladdat borrhål.

Nedan: Försök 2 med frikopplad laddning; 21,2 mm laddning i 37 mm hål.

Slutet av detonationen = jonisationspuls från slutet av laddningen, se Figur 6.



Figur 8: VOD registreringar från sprängförsöken i granitblock.

Ovan: Försök 1 med fulladdat borrhål.

Nedan: Försök 2 med frikopplad laddning; 21,2 mm laddning i 37 mm hål.

### Slutsatser av VOD-mätningarna

- Primern har åstadkommit en "run-up" i sprängämnet men "run-up" avståndet är mycket kort. Sedan detonerade sprängämnet med en jämn VOD.
- VOD-värdena kan jämföras med VOD-värdena i PVC-rörladdningar, se Figur B1 a) i Bilaga 1. I fulladdat hål får sprängämnet en hög VOD p.g.a. den höga inspanning berget ger. I frikopplat hål är sprängämnets VOD den samma som i friliggande laddning. I detta avseende påverkar berget inte sprängämnets funktion, när frikopplingen är tillräckligt stor.

### Empiriska uppskattningar av borrhålstrycken

Många empiriska formler finns för uppskattning av detonationstryck, explosionstryck och borrhålstryck /10/. I Tabell 4 har några enkla formler använts för uppskattningar av nivåerna på borrhålstrycket i Försök 1 och 2.

Detonationstrycket uppskattades m h a ekvationerna 9 /10/ och 10 /13/, explosionstrycket m h a ekvation 11 /10/ och borrhålstrycket m h a ekvation 12 /10/. Värdena på VOD och sprängämnets densitet kommer från mätningarna.

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 \cdot VOD^2}{\gamma_{CJ} + 1} \quad (9)$$

$$\gamma_{CJ} = \frac{1}{1,4035 \cdot (\rho_0 / 1000)^{-0,04} - 1} \quad (10)$$

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot P_{CJ} \quad (11)$$

$$P_b = P_e \cdot \left( \frac{L_e}{L_b} \right) \left( \frac{r_e}{r_b} \right)^2 \quad (12)$$

Här är:  $P_{CJ}$  = detonationstryck (Pa)

$\rho_0$  = sprängämnets densitet = 1169 kg/m<sup>3</sup>

VOD = detonationshastighet hos sprängämnet (m/s)

$\gamma_{CJ}$  = adiabatisk gamma vid CJ punkten

$P_e$  = explosionstryck (Pa)

$P_b$  = borrhålstryck (Pa)

$L_e$  = laddningslängd (m)

$L_b$  = sprängborrhålslängd (m)

$r_e$  = laddningsradie (m)

$r_b$  = borrhålsradie (m)

Tabell 4: Empiriska uppskattningar av olika tryck för fältmätningen i granitblock

Försöksnr.	Försök 1	Försök 2
Laddningens egenskaper	$L_b = L_e = 0,355$ m $r_e = 37$ mm $r_b = 37$ mm $\rho_0 = 1169$ kg/m <sup>3</sup> VOD = 5712 m/s	$L_b = L_e = 0,28$ m $r_e = 21,2$ mm $r_b = 37$ mm $\rho_0 = 1169$ kg/m <sup>3</sup> VOD = 4756 m/s
$P_{C1}$ (GPa)	10,8	7,5
$P_e$ (GPa)	5,4	3,7
$P_b$ (GPa)	5,4	1,2
Max. mätt tryck (GPa)	2,3	0,55
Max mätt. tryck/ $P_b$	0,43	0,46

### Slutsatser av tryckmätningarna

- Den generella regeln att borrhålstrycket minskar drastiskt när laddningen frikopplas håller. Däremot ligger de mätta trycknivåerna mycket under de empiriska uppskattningarna av trycknivåerna. En av orsakerna kan vara givarens långa svarstid. Det tog 34 till 43  $\mu$ s innan trycksignalen nådde sitt maximum. Under den tiden har mycket information gått förlorad. En annan orsak kan vara onoggrannhet i de empiriska uppskattningarna.
- Det krävdes ett antal reflektioner innan trycksignalen nådde max. trycket. Signalerna inleddes med två tydliga språng och sedan följde en långsammare tryckstigning till max. trycket.
- Om man antar att de två inledande sprången har orsakats av den första infallande stötvågen genom vattnet respektive dess reflektion från LHM-koppens innerbotten /10/, så beräknas stötvågens hastighet i vattnet till 1563 m/s för Försök 1 och 812 m/s för Försök 2. Dessa värde är låga särskilt för Försök 2. Det kan bero på svårigheten i att bedöma tryckets ankomsttid pga bruset i början av signalen, se det nedre diagrammet i Figur 7.
- Angående LHM-givarens prestanda kan samma slutsatser dras som i Avsnitt 3.4 i /10/.

## 3.3 Fältmätning i kalkstenspall

### 3.3.1 Försökets utförande

Tekniken att använda LHM-givaren i granitblock kan inte direkt överföras till mätning i pallsprängning. Problemet ligger i kabelhål där signalkabeln från LHM-givaren löper fram till förstärkaren. Det går inte att borra ett sådant hål rakt under sprängborrhålet som man gjorde i blocken. Försök med nya försöksuppställningar har lett till den fungerande teknik som beskrivs nedan. De försök som ledde till den slutliga uppställningen rapporteras i Bilaga 9.

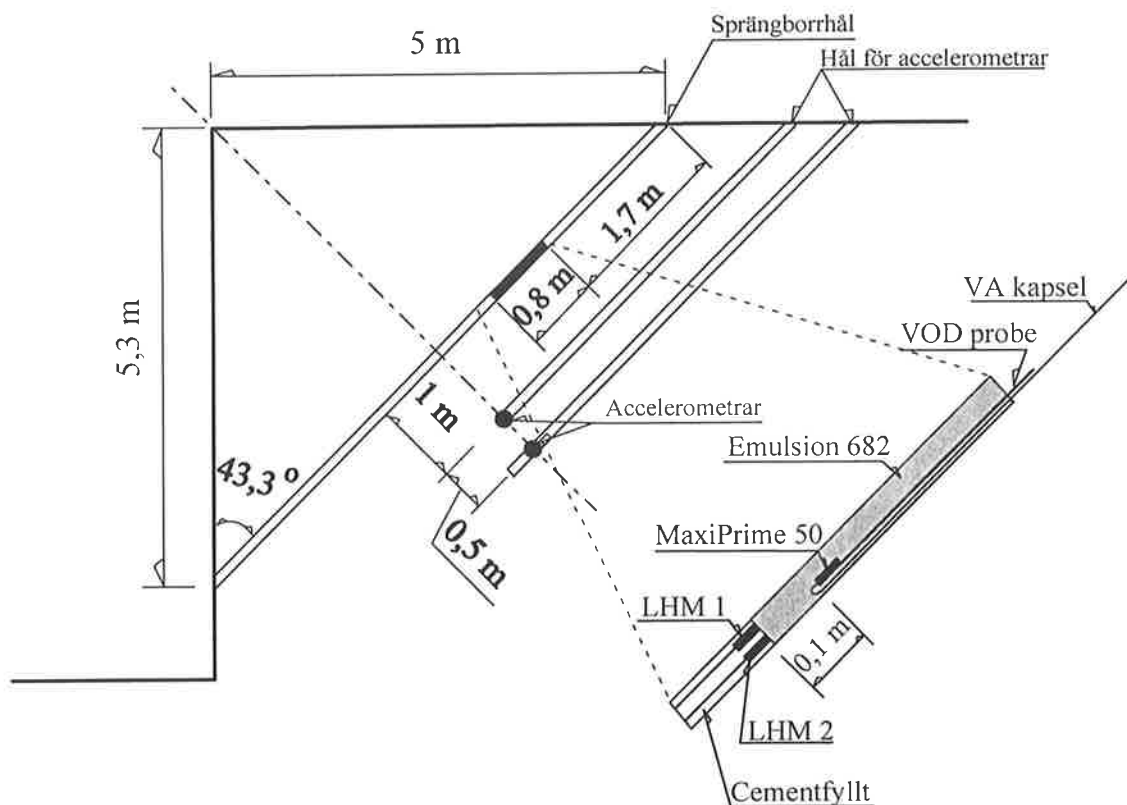


Fältförsöket utfördes i Partek Nordkalk Storugns AB:s kalkstensbrott på Gotland. Valet av kalksten berodde på bergets egenskaper. Det är mjukt och sprucket och har helt andra egenskaper än graniten i Svenneby. Enligt brinnmodellteorierna skall sprängämne Emulsion 682 fungera mycket annorlunda i det här berget.

Försökupställningen visas i Figur 9. Avstånden i Figuren är uppmätta efter borringen respektive givarinstallationen och laddningen. Därför avviker de något från den tänkta uppställningen, se Bilaga 9. Borrhålsdiametern var 89 mm. Sprängborrhålet var snett borrar så att det mynnade ut från pallfronten.

Bakom sprängborrhålet har två parallella hål borrats. De var avsedda för accelerometrar för vibrationsmätning. Accelerometramna monterades i botten av hålen.

I nedre delen av sprängborrhålet göts två LHM-givare med cement och kablarna till givarna löpte ut från hålmynningen i pallfronten och vidarekopplades till förstärkarna. När cementen har härdnat, laddades sprängämnet med primern, sprängkapseln och VOD-sonden ovanpå givarna, se detaljer i Figur 9. Sprängämnet var ca 6 kg Emulsion 682 och primern var en st MaxiPrime av 50 g pressad TNT och PETN. Andra detaljmått kring laddningen finns i Figur 9. Till sist fylldes med en förladdning av 5 mm grus.



Figur 9: Uppställningen för fältförsök i kalkstenspallen. Figuren till höger är en förstoring av en del av borrhålet där laddningen med tillbehör och givarna satt.

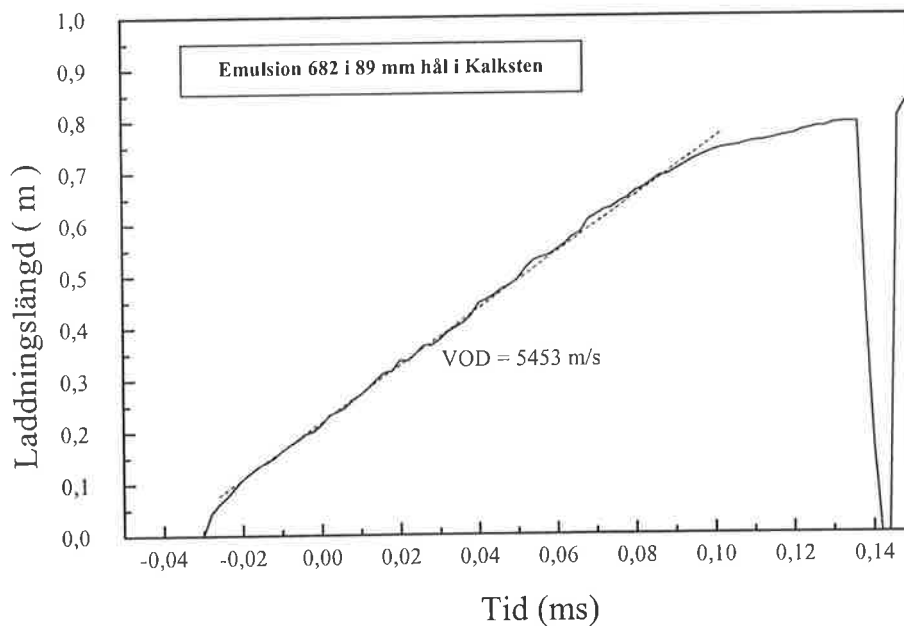
Hela operationen är mycket komplicerad pga långa avstånd i hålet. De praktiska detaljerna redovisas i Bilaga 9 medan Bilaga 10 visar pallens utseende före och efter sprängningen.

Registreringsutrustningen var den som beskrivits i Bilaga 9, dvs MiniTrap för VOD, digital oscilloskop LeCroy 9354a för tryckgivarna och digital bandspelare Sony SIR-1000 för accelerometrarna.

### 3.3.2 Försöksresultat

#### 3.3.2.1 Detonationshastigheten

VOD i sprängämnet mättes kontinuerligt och resultatet visas i Figur 10. Det syns tydligt att sprängämnet detonerade med en jämn hastighet på 5453 m/s efter en mycket kort "run-up" vid primern. Däremot är VOD-värdet lågt jämfört med tidigare mätningar i andra inneslutningar, se Figur B1 a) i Bilaga 1. Det är till och med lägre än i PVC-rör med samma laddningsdiameter. Efter en noggrann kontroll av mätsystemet och efterföljande analys kan mätfel uteslutas. Det låga VOD-värdet beror troligtvis på bergets egenskaper. Det är mjukt och sprucket och ger en dålig inneslutning för laddningen.



Figur 10: VOD hos Emulsion 682 mätt i  $\phi$  89 mm hål i kalkstenspall.

### 3.3.2.2 Borrhålstrycket

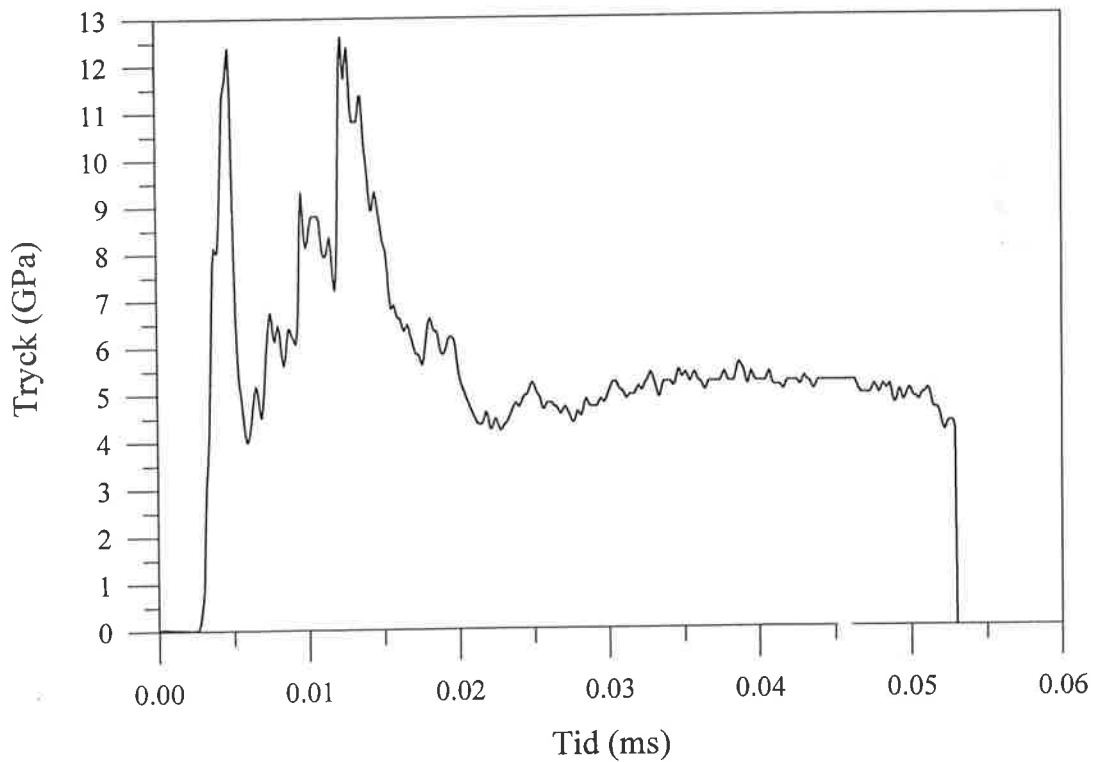
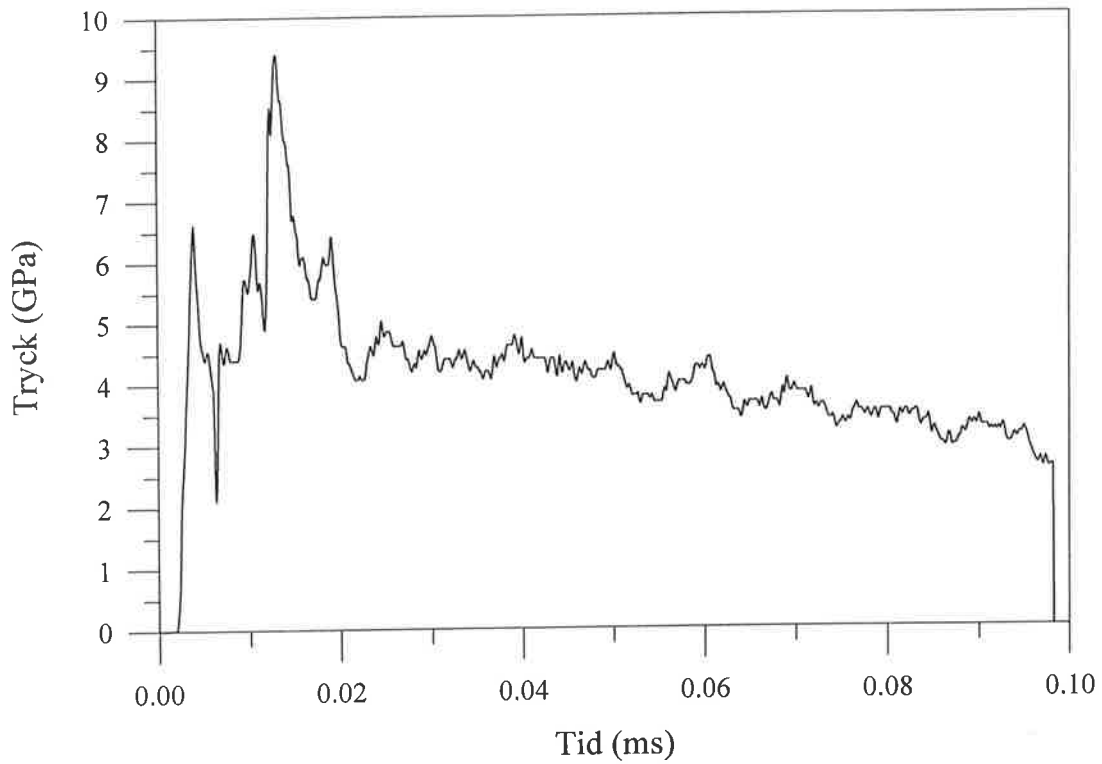
Tryckregistreringar har gjorts med båda givarna. De visas i Figur 11 var för sig och i Figur 12 överlagrade på varandra. Det finns både likheter och olikheter mellan signalerna. Likheten är att båda signaler följer samma mönster. De börjar med en period med högfrekvent innehåll, med stora svängningar i tryckamplituden, och de slutar med avbrott i kablarna, se analysen i /10/. Perioden med högfrekvent innehåll är ca 20  $\mu$ s lång. Efter den perioden stabiliseras signalerna vid ca 5 GPa. Därefter börjar trycket som registreras av Givare 1 att sakta avta och det har sjunkit till ca 2,5 GPa när kabelbrottet inträffade. Trycket som registreras av Givare 2 hinner inte avta nämnvärt före kabelbrottet. Signallängden mätt av Givare 1 är ca 96  $\mu$ s och av Givare 2 ca 50  $\mu$ s.

Det är svårt att bestämma max. trycken ur registreringarna pga de högfrekventa innehållen i början av signalerna. Dessutom är amplituderna på en del av spikarna, som varierar mellan 9 och 13 GPa, orimligt höga. Enligt de termodynamiska beräkningarna med Cheetah, se Bilaga 4, är CJ trycket för Emulsion 682 vid en ideal detonation 10,2 GPa. Så höga tryck borde inte LHM-givarna kunna registrera.

#### Analys av de högfrekventa svängningarna

Som nämnts kan de högsta spikarna i signalerna inte tolkas som verkliga tryck. Det kan finnas en förklaring till detta med tanken på givare- och kabelkonstruktionen, se Figur 13. För att underlätta monteringen av givaren i hålet och för att skydda kabeln, har ett ca 3 m långt och  $\phi$  18 mm stålrör skarvats på LHM koppen. Kabeln ligger inne i röret och utrymmet mellan kabeln och rörväggen är fyllt med epoxi. Sedan gjuts hela givarearrangemanget in i borrålet. När laddningen detonerar ovanpå LHM-givaren, fortplantas kraftiga stötvågor via LHM stålkoppen till stålröret och komprimerar kabeln. Den dynamiska kompressionen kan orsaka kortvariga närkontakter mellan ledarna och resulterar i hastiga motståndsminskningar i registreringen. Efter konverteringen av motståndsminskning till tryck, visualiseras de hastiga motståndsminskningarna som snabba tryckstigningar. Detta fenomen har även observerats i tidigare försök i granitblocken /10/.

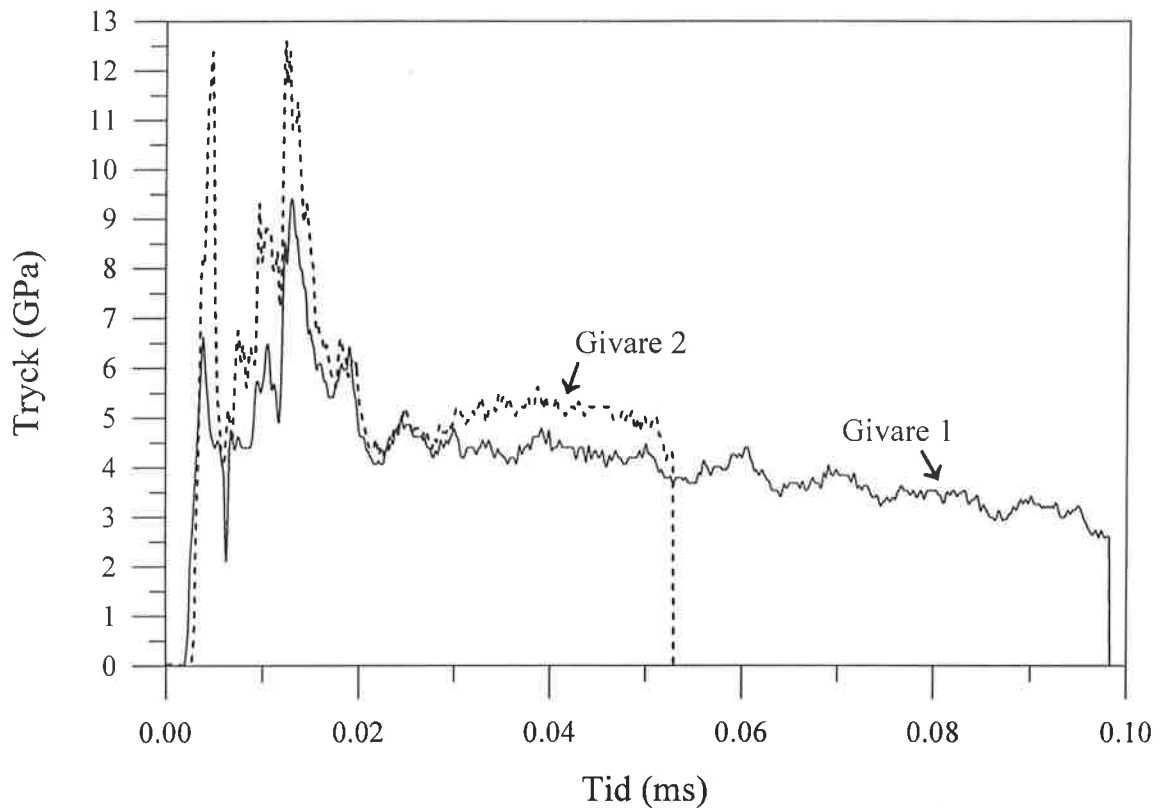
En annan möjlig orsak till de höga spikarna härrör från kolmotståndets tryckkänslighet. Som syns i Figur B12 i Bilaga 7, blir kolmotståndet mycket okänsligt för tryck när trycket är över ca 5 GPa. Det innebär en trycksignal på den nivån är mycket känslig för störningar. En lite störning i motståndsvärde resulterar i en stor svängning i trycksignalen. Figurer 12 och 14 visar tydligt en sådana effekt i fältmätningen i kalkstenspallen. De procentuella motståndsminskningarna i båda givarna skilde mycket lite från varandra, ca 2% i den första toppen, se Figur 14. Ändå resulterade detta i en motsvarande skillnad i trycknivå på ca 6 GPa eller ca 100%, se Figur 12.



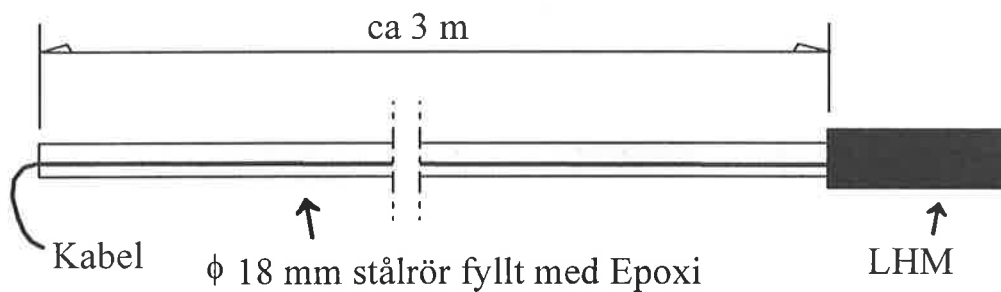
Figur 11: Borrhålstrycken mätta i ett  $\phi$  89 mm fulladdat hål i kalkstenspall.

Ovan: Signalen från Givare 1, se Figur 9.

Nedan: Signalen från Givare 2, se Figur 9.

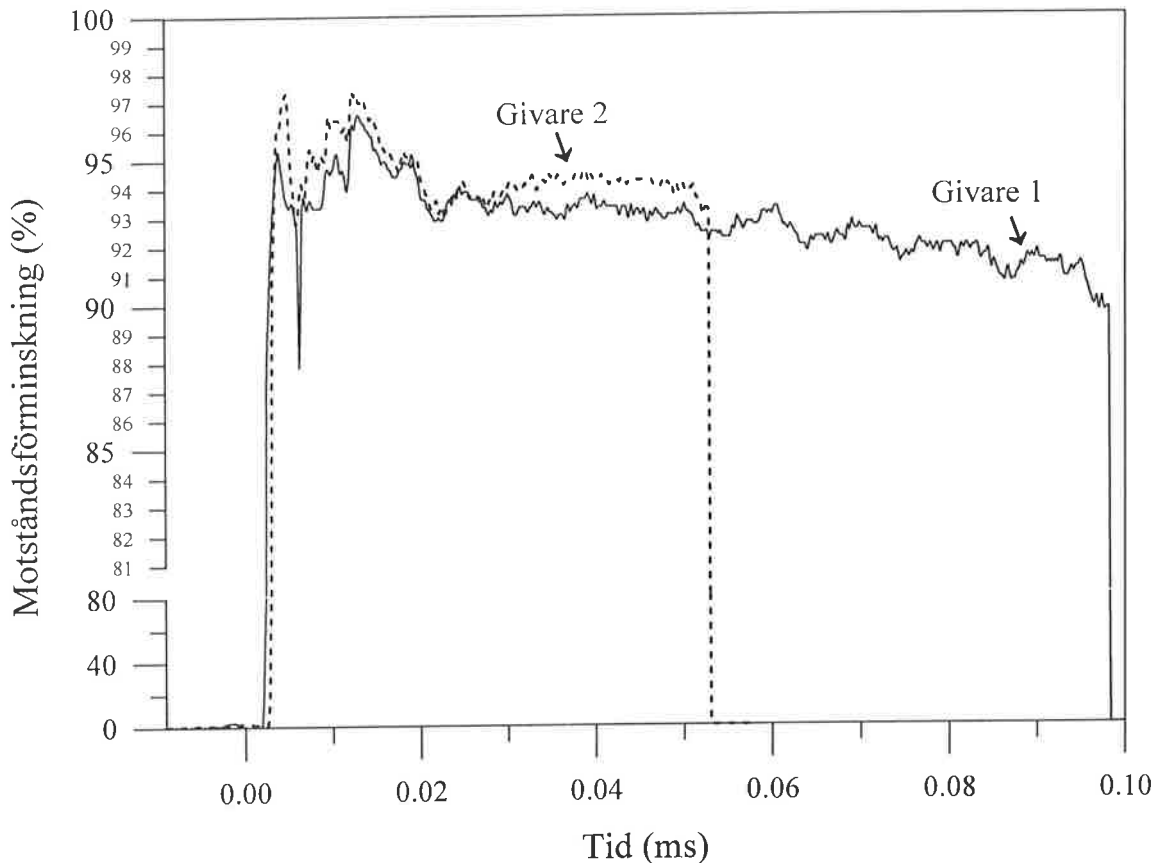


Figur 12: Jämförelse av borrhålstryck registrerat av två LHM givare, se Figur 9.



Figur 13: Givare- och kabelkonstruktionen för tryckmätningen i kalkstensspallen.

Med tanke på de två ovannämnda faktorerna kan de högfrekventa svängningarna i början av trycksignalerna betraktas som brus eller en superponering av brus på trycksignalerna.



Figur 14: Jämförelse av motståndsminskningen hos de två LHM-givare som användes i fältmätningen i kalkstenspallen, se Figur 9. Observera att en del av y-axeln har förstörats kraftigt.

#### Analys av tryckamplituderna jämfört med blockförsöken

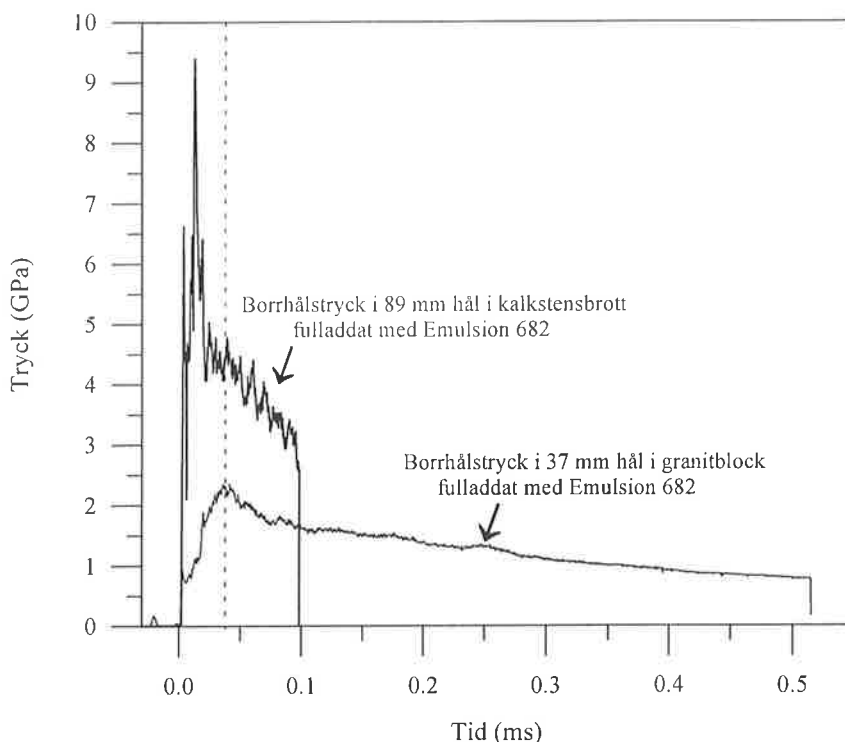
Om samma empiriska formler som användes i blockförsöken tillämpas i kalkstenspallen, se ekvationer 9 till 12 i Avsnitt 3.2.2, kan de olika trycken uppskattas till:

Detonationstrycket ( $P_{CI}$ ) = 9,8 GPa

Explosionstrycket ( $P_e$ ) = Borrhålsttrycket ( $P_b$ ) = 4,9 GPa

Då skulle det uppskattade borrhålsttrycket överensstämja med trycknivån i signalerna efter de högfrekventa svängningarna. I de tidigare mätningarna i granitblocken låg däremot givarregistreringarna ca 50% under de uppskattade borrhålsttrycken, se Tabell 4. I granitblocket med ett fulladdat sprängborrhål är t ex det uppskattade borrhålsttrycket ca 5,4 GPa, vilket inte skiljer sig så mycket ifrån uppskattningen i kalkstenspallen. Ändå är tryckregistreringarna mycket olika.

Därför har de två registreringarna jämförts i Figur 15. Det syns direkt att a) givaren registrerade en avsevärt högre trycknivå i kalkstensspallen än i granitblocket och b) givaren i kalkstensspallen har en kortare svarstid, dvs trycket når sitt maximum på kortare tid.



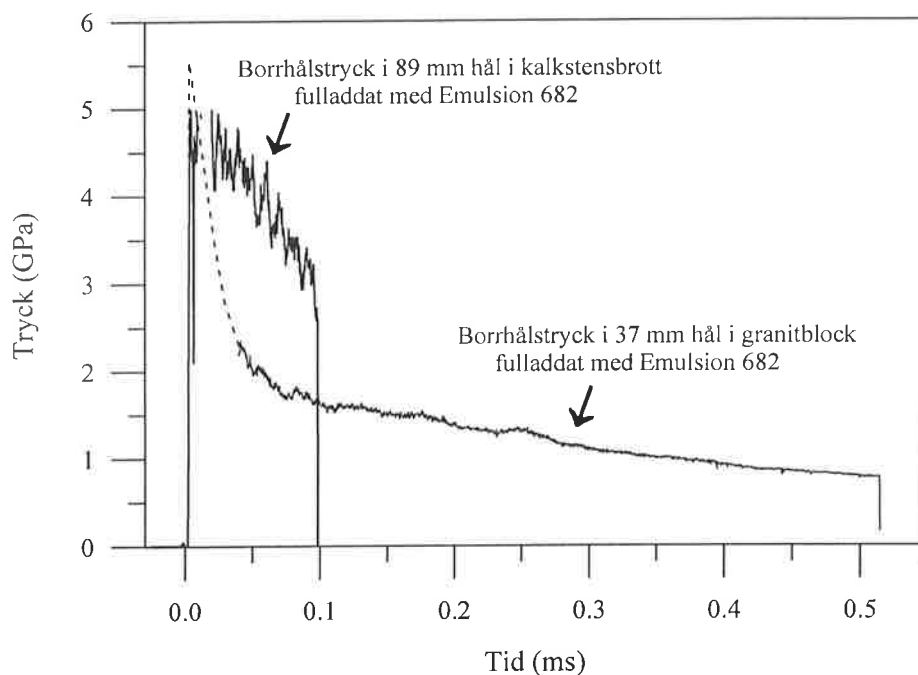
Figur 15: Jämförelse mellan tryckregistreringen från kalkstensspallen och granitblocket med fulladdat hål.

Förklaringen till den kortare svarstiden är att givaren har varit hårdare inspänd i kalkstensspallen. I kalkstensspallen ingöts LHM-givarna med cement. Medan i granitblocken ingöts LHM-givarna med epoxi när givarna fastnade ca 15 till 20 cm ovanför hålbotten, se fotnoten till Tabell 2. Epoxiet är mycket mjukare jämfört med cement eller berg. Därför kan stötvågen från detonerande sprängämne i kalkstensspallen fortplanta sig genom cement och LHM-givarens stålkopp och komprimerar kolmotståndet och vattnet allsidigt. På det sättet uppnås mekanisk jämvikt mellan spränggaserna och givaren snabbare. Dessutom var laddningsdiametern betydligt större än LHM-givarens diameter i kalkstensspallen och detta förstärker effekten av den allsidiga komprimeringen.

För att förstå skillnaden i trycknivåer mellan två fältmätningar har trycksignalerna i Figur 15 rekonstruerats i Figur 16 enligt följande principer.

- 1) Högfrekventa svängningar i signalen från kalkstensspallen kapas.

- 2) Maximaltrycken i de båda försöken överensstämmer med de empiriska uppskattningarna av borrhålstrycken.
- 3) Signaldelen före det registrerade max. trycket i signalen från granitblocket ersätts av en extrapolering till det uppskattade borrhålstrycket, se den streckade linjen i Figur 16.



Figur 16: Rekonstruktion av trycksignalerna från fältmätningarna i granitblocket och i kalkstenspallen.

Anledningen till dessa åtgärder är:

- 1) De högfrekventa svängningar är inga pålitliga trycksignaler, som visades av den tidigare analysen.
- 2) Maximaltrycket givaren kan registrera borde inte överstiga de empiriska uppskattningarna.
- 3) Signaldelen under givarens svarstid motsvarar inte trycket i spränggaserna i sprängborrhålet.

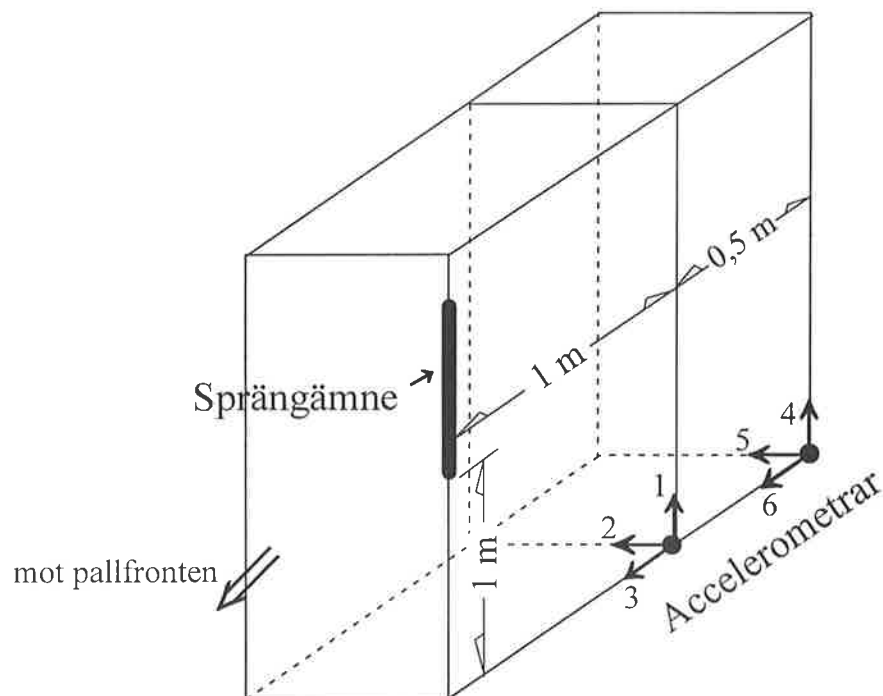
Nu efter rekonstruktionen kan man konstatera att borrhålstrycket i granitblocket föll mycket snabbare än i kalkstenspallen. Därför kunde borrhålstrycket i kalkstenspallen hållas på en högre nivå under en längre tid, trots att det uppskattade borrhålstrycket var snarlikt i båda försöken.



Analysen och slutsatserna ovan bygger på ett antal antaganden eller hypoteser som leder till att trycksignalernas utseende kan förklaras. Att bekräfta dessa analyser kräver flera fältmätningar och/eller simuleringar.

### 3.3.2.3 Vibration i berget

Tre accelerometrar monterades i varje accelerometerhål. Accelerometrarnas relativa positioner till sprängladdningen visas i Figur 17 och signalerna från samtliga accelerometrar visas i Figur 18. Ingen detaljerad analys utfördes på vibrationsignalerna. Det kan konstateras att vibrationsnivåerna var höga. Med tanke på de korta avstånden mellan accelerometrarna och sprängladdningen kan nivåerna vara rimliga.



Figur 17: 3D skiss på placeringen av accelerometrar relaterat till sprängborrhålet, se också Figur 9.

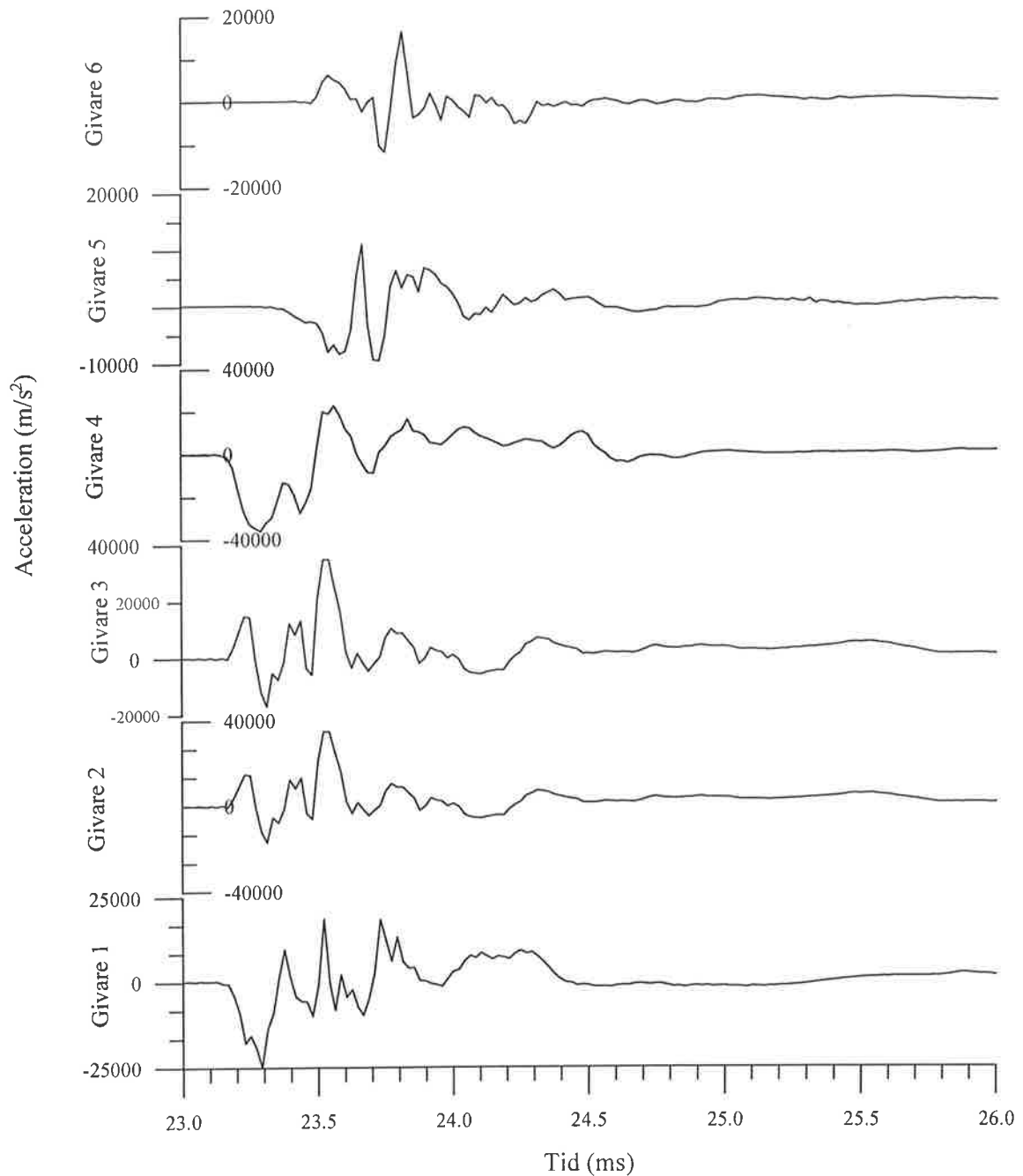
### 3.3.2.4 Slutsatser från fältmätningen i kalkstenspallen

Trots att metoden med ett snett borrarat sprängborrhål kräver mycket komplicerade förberedelser och mätprocedurer fungerade den bra i kalkstenspallen. Många mätutrustningar har varit inblandade och många resultat har erhållits.

Detonationen i sprängämnet fortlantas jämnt men VOD-värdet var lågt i jämförelse med mätningarna i andra inneslutningar. Detta kan förklaras av bergets mjuka och spruckna karaktär.

Trycksignalerna har överlagrats med högfrekventa svängningar vid ankomsten av stötvågor. Detta kan bero på den styva kabelkonstruktionen. Generellt var de mätta tryckamplituderna höga.

Vibrationerna i berget har mätts i form av accelerationer. Även här var de mätta nivåerna mycket höga.



Figur 18: Mätningar av acceleration i berget i fältförsök i kalkstenspallen på Gotland.

## 4 Simulering av sprängämnets expansionsarbete i borrhål

Det finns främst tre målsättningar med datorsimuleringen. Den första är att studera detaljerna i tryckregistreringarna från fältmätningarna. Med hjälp av dator och program DYNA2D får man en förståelse för vågrörelser t ex reflektioner och superponeringar i LHM-koppen och deras motsvarande inverkan på trycksignalen. Den andra är att studera relationen mellan LHM-givarens tryckregistrering och trycket i spränggaserna i borrhålet. Med andra ord, hur tryckregistreringen svarar mot det riktiga borrhålstrycket. Den tredje och den viktigaste målsättningen är att kalibrera sprängämnets brinnmodell som har tagits fram genom laboratorieförsök.

Vi har haft ambitionen att simulera alla fältmätningar med DYNA2D dvs både mätningarna i granitblock och i kalkstenspall med fulladdat sprängborrhål samt i granitblock med frikopplad laddning. Efter många inledande simuleringar kan det konstateras att SveBeFo:s nuvarande simuleringskapacitet, en PC version av DYNA2D med Lagrange beskrivning, inte klarar alla planerade simuleringar. Försöket i granitblocket med frikopplad laddning kan t ex inte simuleras pga stora gasrörelser i hålet. Inte heller kan simulering av försöket i kalkstenspallen klaras av p.g.a. sprängningens stora skala och 3-dimensionella karaktär. Därför har simuleringen koncentrerats till granitblocket med fulladdat hål. Även i det här fallet räckte simuleringskapaciteten knappt till. Mer om detta följer i nedanstående beskrivning.

### 4.1 Materialdata till simuleringarna

Ingående material i simuleringarna är sprängämne Emulsion 682, primer, LHM-koppen av stål, vatten och tätmassa i koppen, täckbricka av plexiglas (PMMA) på koppen och berget granit. Egenskaperna hos Emulsion 682 har beskrivits i Avsnitt 2.2. Egenskaperna för övriga material som krävs av DYNA2D hämtades från litteraturen /14, 15, 16, 17, 18/ och redovisas nedan. Generellt behöver DYNA2D en materialmodell och en tillståndsekvation för varje material. De olika materialmodellerna och tillståndsekvationerna i DYNA2D förklaras mycket detaljerat i /19/. Observera att DYNA2D inte använder SI-enheter för in- och utdata i beräkningarna.

#### Primer

Primern simuleras med sprängämnet PETN som detonerar idealt. Tillståndsekvationen för spränggasen är i JWL-form ges av ekvation 13.

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (13)$$

Här är  $P$  tryck (Mbar),  $V$  relativ volym och  $E$  specifik inre energi (Mbar·cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>).  
Parametervärdena ges av  $A = 6,170$  Mbar,  $B = 0,1693$  Mbar,  $R_1 = 4,4$ ,  $R_2 = 1,2$  och  $\omega = 0,25$ .

Dessutom har PETN följande detonationsegenskaper: sprängämnes densiteten  $\rho_0 = 1,77$  g/cm<sup>3</sup>, VOD = 0,83 cm/μs och detonationsenergin,  $E_0 = 0,101$  Mbar cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.

### Stål

Materialmodellen är en Johnson-Cooks modell /19, 16/, där flytspänningen beskrivs av ekvation 14.

$$\sigma_y = \left[ A + B \left( \bar{\epsilon}^p \right)^n \right] \left[ 1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*) \right] \left[ 1 - (T^*)^m \right] \quad (14)$$

Här är  $\sigma_y$  flytspänning,  $\bar{\epsilon}^p$  plastisk effektivtöjning,  $\dot{\epsilon}^*$  dimensionslös töjningshastighet,  $T^*$  homolog temperatur. Parametervärdena är  $A = 0,00792$ ,  $B = 0,0051$ ,  $n = 0,26$ ,  $C = 0,014$  och  $m = 1,03$ .

Dessutom har stålet en densitet på  $\rho_0 = 7,83$  g/cm<sup>3</sup>, en skjuvmodul  $G = 0,77$  Mbar, en smälttemperatur 1783 °K och en specifik värme,  $c_v = 4,77 \times 10^{-6}$  Mbar cc/cc.

Kriterium för materialbrott är en hydrostatisk utstötningshållfasthet på 3,0 Mbar.

Tillståndsekvationen för stålet är en Gruneisen ekvation /19/, ekvation 15.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 - \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (15)$$

Här är  $P$  tryck,  $\rho_0$  densitet,  $\mu$  volymdeformation,  $\gamma_0$  Gruneisen gamma och  $E$  specifik inre energi. Parametervärdena är  $C = 0,4567$  (cm/μs),  $S_1 = 1,49$ ,  $S_2 = S_3 = a = 0$  och  $\gamma_0 = 2,17$ .

### Vatten, Tätmassa, PMMA och Granit

Materialmodellen för tätmassa, PMMA och granit är en Elastisk-Plastisk-Hydrodynamisk modell /19/ och parametervärdena ges i Tabell 5.

Tabell 5: Materialparametrar för tätmassa, PMMA och granit

Materialparameter	PMMA	Tätmassa	Granit
Densitet, $\rho_0$ , (g/cm <sup>3</sup> )	1,186	2,01	2,627
Skjuvmodul, G, (Mbar)	0,024	0,104	0,2826
Flytspänning, $\sigma_y$ , (Mbar)	0,0005	0,0005	0,005
Plastisk modul, $E_p$ , (Mbar)	0,0	0,0	0,0
Linjär deformationshårdnande koefficient, $a_1$	0,0	0,0	0,0
Kvadratisk deformationshårdnande koefficient, $a_2$	0,0	0,0	0,0
Hydrostatisk utstötningshållfasthet, ISPALL	3,0	3,0	3,0
Plastisk töjning vid materialbrott, $\epsilon_f$ , (Mbar)	0,0	0,0	0,0

Tillståndsekvationen för vatten, tätmassa, PMMA och granit är en Gruneisen ekvation /19/, se ekvation 15. Parametervärdena ges i Tabell 6. Dessutom har vattnet en densitet på 1,0 g/cm<sup>3</sup>.

Tabell 6: Gruneisen tillståndsekvation för vatten , tätmassa, PMMA och granit

Parameter	Vatten	PMMA	Tätmassa	Granit
C (cm/ $\mu$ s)	0,148	0,2598	0,35	0,37
$S_1$	2,560	1,516	1,32	1,139
$S_2$	-1,986	0,0	0,0	0,0
$S_3$	0,2268	0,0	0,0	0,0
Gruneisen gamma, $\gamma_0$	0,50	0,97	2,0	2,0
a	0,0	0,0	0,5	0,5

#### 4.2 Inledande simuleringar

Som nämndes tidigare är SveBeFo:s datorkapacitet begränsad. Därför har vi haft en simuleringsstrategi att börja med enklare uppställningar och föra in detaljerna stegvis. På så sätt utnyttjas beräkningstiden effektivt och dessutom kan man snabbt spåra eventuella fel i varje steg. Många inledande simuleringar med DYNA2D har utförts huvudsakligen med nedanstående 2 uppställningar.

- 1) uppställning med enbart sprängämne och LHM givare
- 2) uppställning med sprängämne, LHM givare och en del omgivande berg

Många variationer av små detaljer tillkom i varje uppställning. T ex användes både Emulsion 682, andra emulsionssprängämnen och ideala sprängämnen. LHM-givaren simulerades antingen med en förenklad konstruktion bestående av bara stålkoppen,

täckbricka av PMMA och vatten eller med alla de detaljer som visas i givarkonstruktionen i Figur 5. Randen kan vara stel (ingen rörelse alls), fri eller icke reflekterande (ingen vågreflektion). Parametrarna i spränggasens tillståndsekvation varierades också. Vid varje variation i uppställning beräknades trycket i det läge i LHM-koppen där kolmotståndet sitter. VOD i sprängämnet beräknades också som en kontroll på sprängämnets funktion.

De inledande simuleringarna har gett oss mycket gott underlag för mer komplicerade simuleringar. Två viktiga erfarenheter är särskilt nämnvärda.

- 1) Om LHM-givaren är mycket inspänd t ex när randen är en stel vägg eller när LHM-givaren omges av mycket berg, blir givarens svarstid avsevärt kortare. Orsaken är att stötvågor fortplantas starkt genom stålkoppen och påskyndar tryckutjämningen i vattnet i LHM-givaren.
- 2) Trycket avtar mycket snabbare i simuleringen än i mätresultaten. Det visade sig dock av senare simuleringar att det snabba tryckavtagandet berodde på för lite bergmaterial kring LHM-givaren i simuleringarna, se vidare analys i nästa avsnitt.

#### 4.3 Simulering av sprängämnets expansionsförlopp i ett fulladdat hål i granitblock

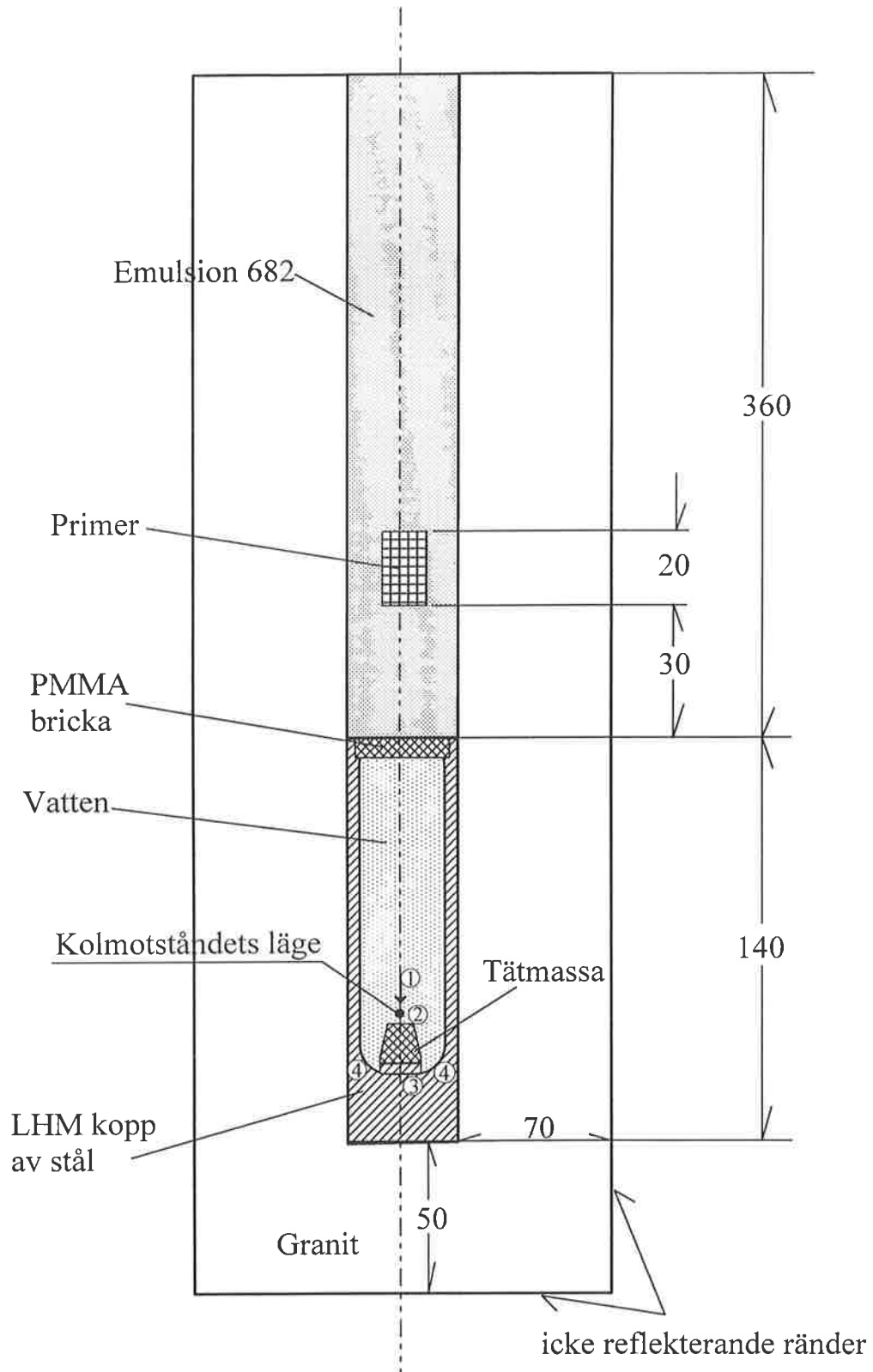
##### 4.3.1 Simuleringsuppställning

I fältmätningen i granitblock med ett fulladdat hål, var blockets dimensioner  $2,2 \times 2,0 \times 1,33 \text{ m}^3$ , se Tabell 2 i Avsnitt 3.2.1. Blocket är egentligen för stort för SveBeFo:s simuleringskapacitet. Därför måste försöksuppställningen förenklas och simuleringen utfördes i två steg. Alla uppställningar är rotationssymmetriska kring borrhålsaxeln.

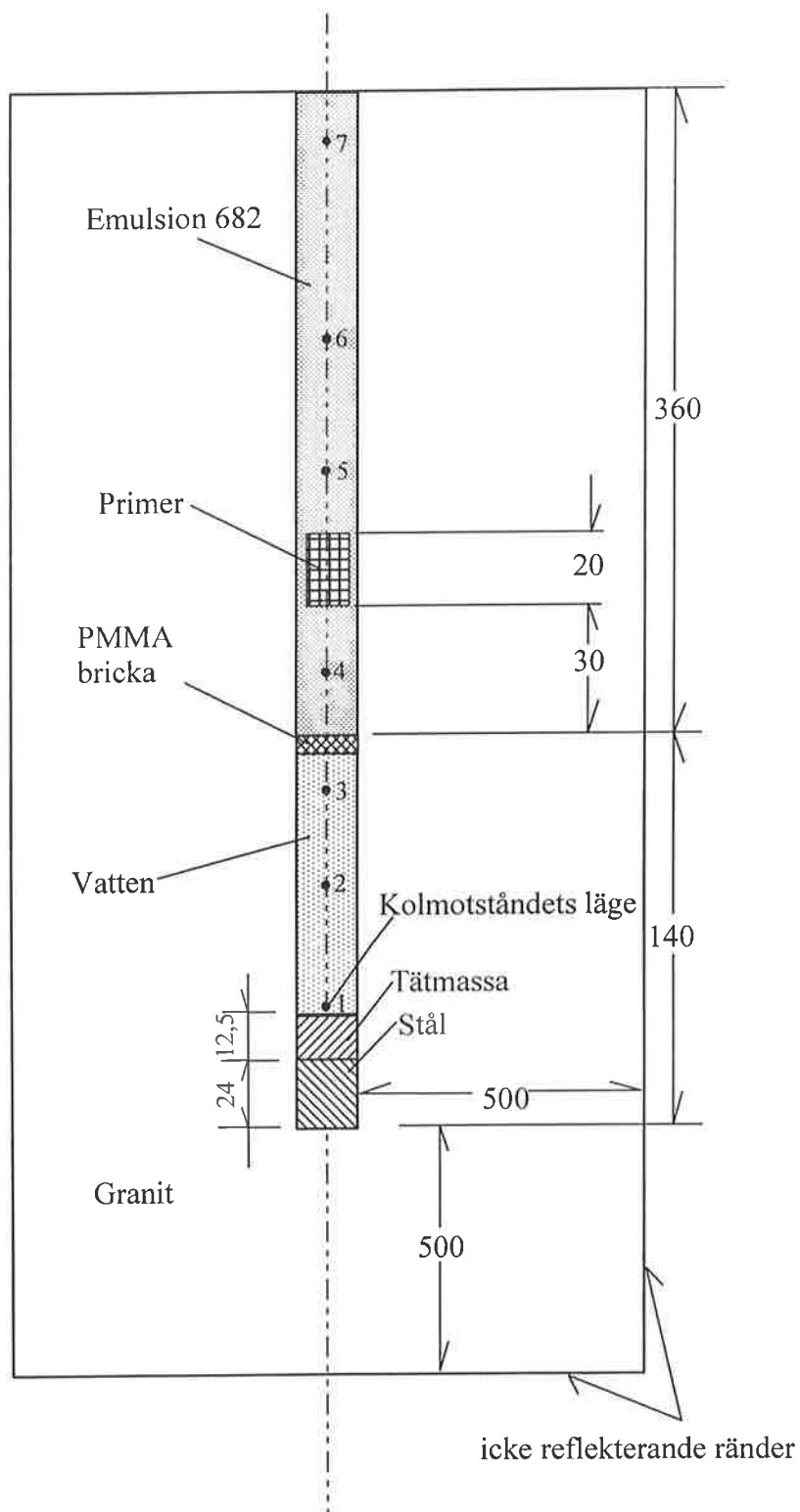
I den ena uppställningen simulerades LHM-givaren med alla detaljkonstruktioner enligt Figur 5 på bekostnad av blockstorleken. Bara en liten del av berget kunde tas med. Figur 19 är ett exempel. I den andra uppställningen simulerades LHM-givaren med en förenklad konstruktion och resterande beräkningskapacitet användes till att simulera så mycket bergmassa som möjligt. Figur 20 är ett exempel.

För att verifiera betydelsen av blockstorleken på tryckregistreringen, har två kontrollsimuleringar utförts. Uppställningen visas i Figur 21. Den enda skillnaden mellan de två simuleringarna är blockstorleken.

Materialdata till simuleringen ges i Avsnitt 4.1. Måttet på LHM-givaren finns i Figur 5 och övriga geometriska mått finns i Figurerna 19, 20 och 21. Dimensionerna i fältmätningen finns i Tabell 2 i Avsnitt 3.2.1.

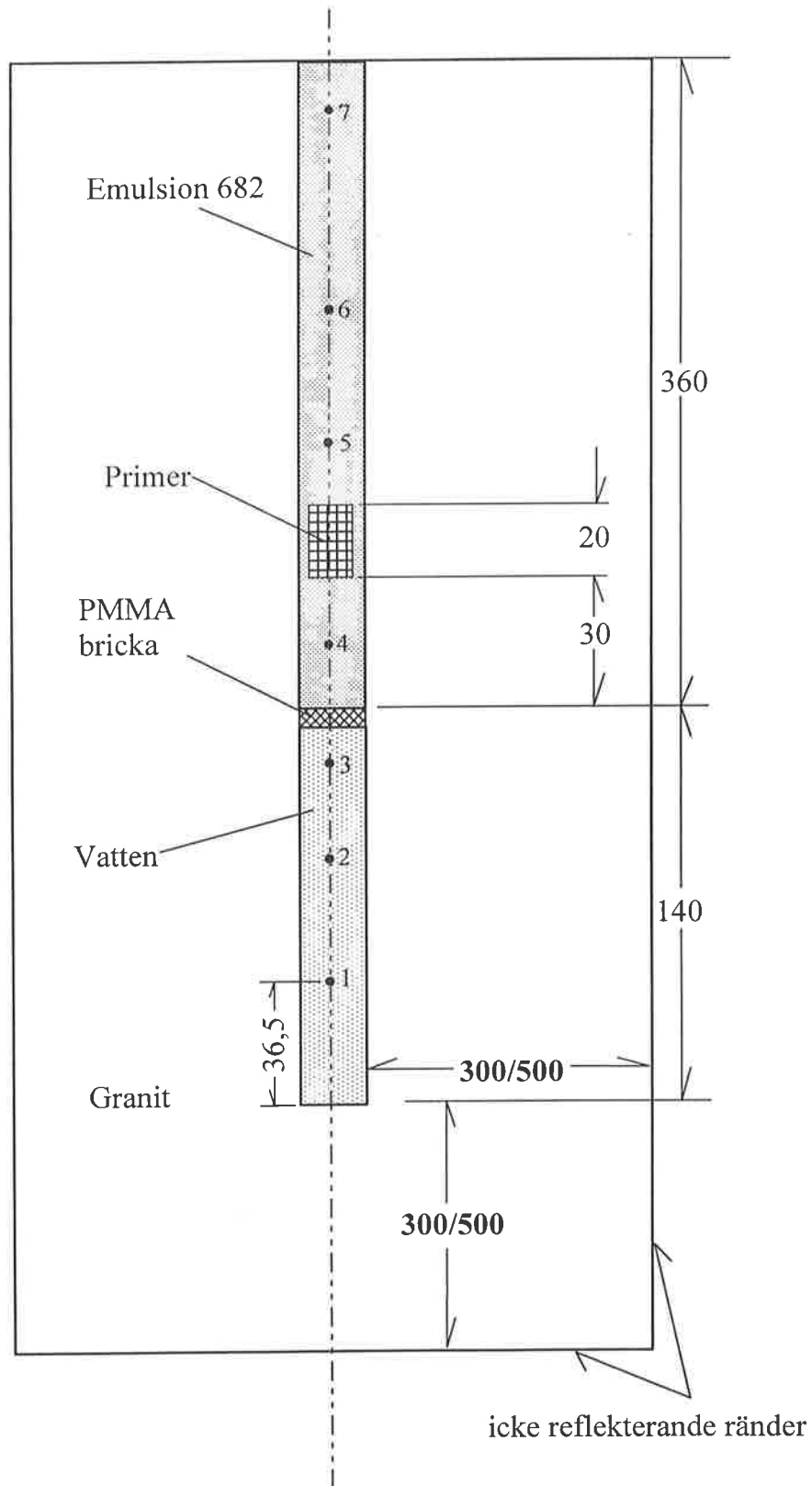


Figur 19: En uppställning för simulering med DYNA2D av fältnätning i granitblock. Här simuleras LHM-givaren med alla detaljer men omgivande bergmassa får mycket begränsad utsträckning.



Figur 20: En annan uppställning för simulering med DYNA2D av fältmätning i granitblock. Här simuleras LHM-givaren med en förenklad konstruktion och resterande kapacitet används för simulering av så mycket omgivande bergmassa som möjligt.



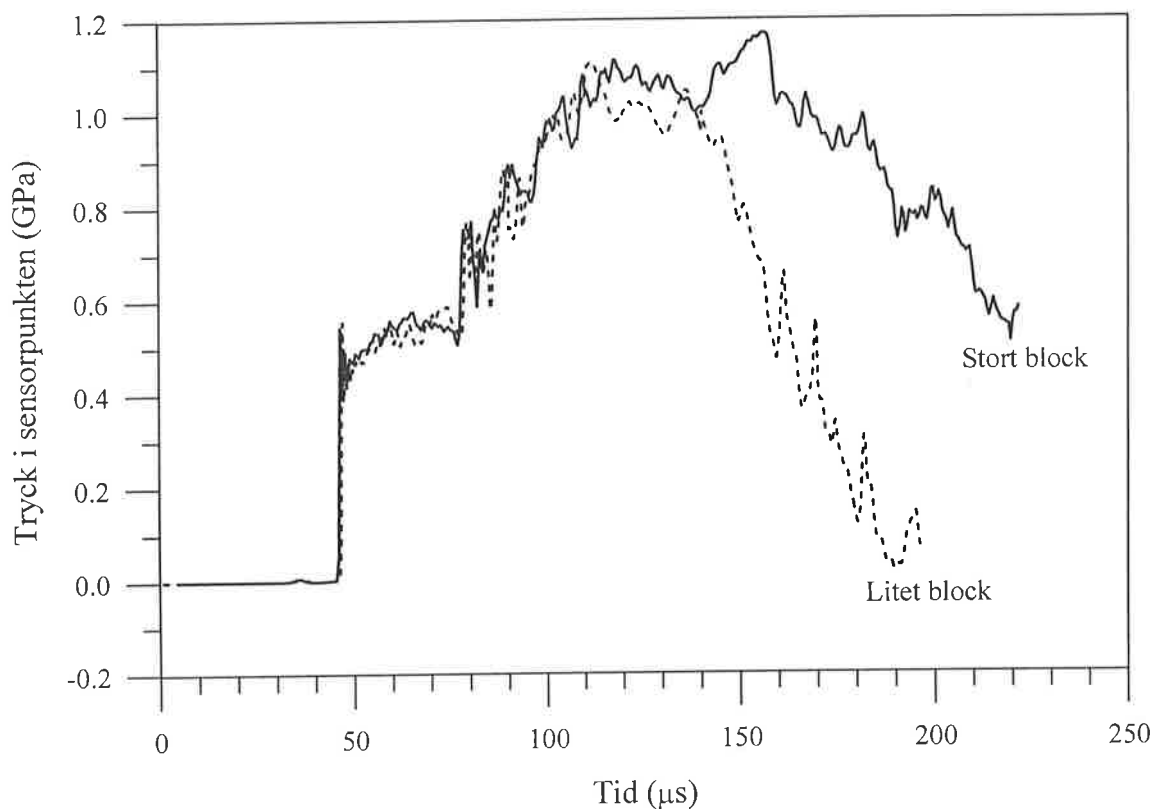


Figur 21: Uppställningen för två kontrollsimuleringar där enbart blockstorlek varierar. Det stora blocket har en diameter på 1,037 m och det lilla 0,637 m.

### 4.3.2 Resultat

#### Betydelse av blockstorleken

Resultatet från kontrollsimuleringarna enligt Figur 21 visas i Figur 22 i form av trycket mätt i LHM-givaren i punkt 1 i Figur 21. Alla andra parametrar är identiska förutom blockstorleken.



Figur 22: Betydelse av blockstorlek på tryckvaraktighet. Det stora blocket är en cylinder med diameter på 1,038 m och det lilla 0,638 m, se Figur 21. Övriga data i simuleringarna är identiska.

Det framgår tydligt av Figur 22 att blockstorleken är en avgörande parameter för tryckvaraktigheten. När blocket är litet, förflyttas berget utåt snabbt och trycket i hålet och i LHM avtar också snabbt. Skillnaden blir märkbar efter ca 70  $\mu\text{s}$  vilket ungefär motsvarar ankomsten av den första reflekterade vågen från den fria ytan.

#### Vågrörelser i vattnet i LHM-koppen

Med en detaljerad beskrivning av LHM-givaren i en simuleringsuppställning som Figur 19, kan man studera vågrörelser i vattnet i den. Resultatet redovisas i Figur 23a i form

av beräknat tryck i det läge där kolmotståndet är placerat, se Figur 19. Flera vågreflektioner eller rättare sagt superponeringar av reflekterade vågor kan observeras i trycktidförloppet i form av trycktoppar. Med hjälp av våghastigheten i vattnet kan de första 4 trycktopparna identifieras. Topparna markerades med siffror 1 till 4 i Figur 23a och topparnas ankomster markerades med motsvarande siffror i Figur 19. De är, ①: direkt stötvågen ankommande genom vattenpelaren, ②: reflektionen från tätmassan som stöder kolmotståndet, ③: reflektionen från koppens stålbotten och ④ reflektioner från koppens nedre hörn.

En jämförelse mellan simuleringsresultatet och mätresultatet i Figur 23b visar att de fyra topparnas tidsmässiga överensstämmelse är utmärkt. Det syns också i Figur 23b att det simulerade trycket avtar mycket snabbare. En trolig förklaring är att uppställningen i Figur 19 har diametern  $\phi$  177 mm och blocket ca 2 m.

#### Jämförelse mellan simulerad och mätt tryckregistrering

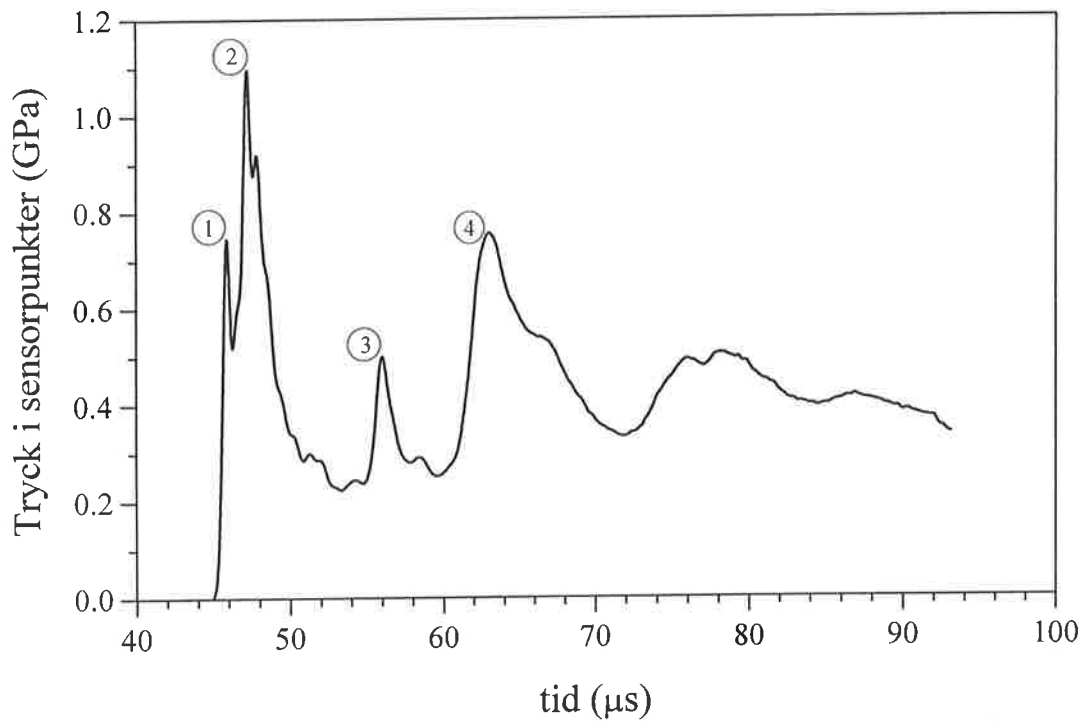
I den simulering som visades i Figur 20 användes mycket av elementindelningen till berget. LHM-koppen simulerades med en stålbotten och ett lager tätmassa. Koppens stålvägg ignoreras. Resultatet från den simuleringen redovisas i Figurerna 24, 25 och 26.

Den beräknade trycktidförloppet i kolmotståndets läge i LHM-koppen visas i Figur 24 och jämförs med det mätta förloppet i Figur 25. De första tryckuppgångarna i båda registreringarna stämmer utmärkt. Sedan börjar kurvorna gå isär. Den beräknade tryckkurvan har lägre amplitud och kortare varaktighet.

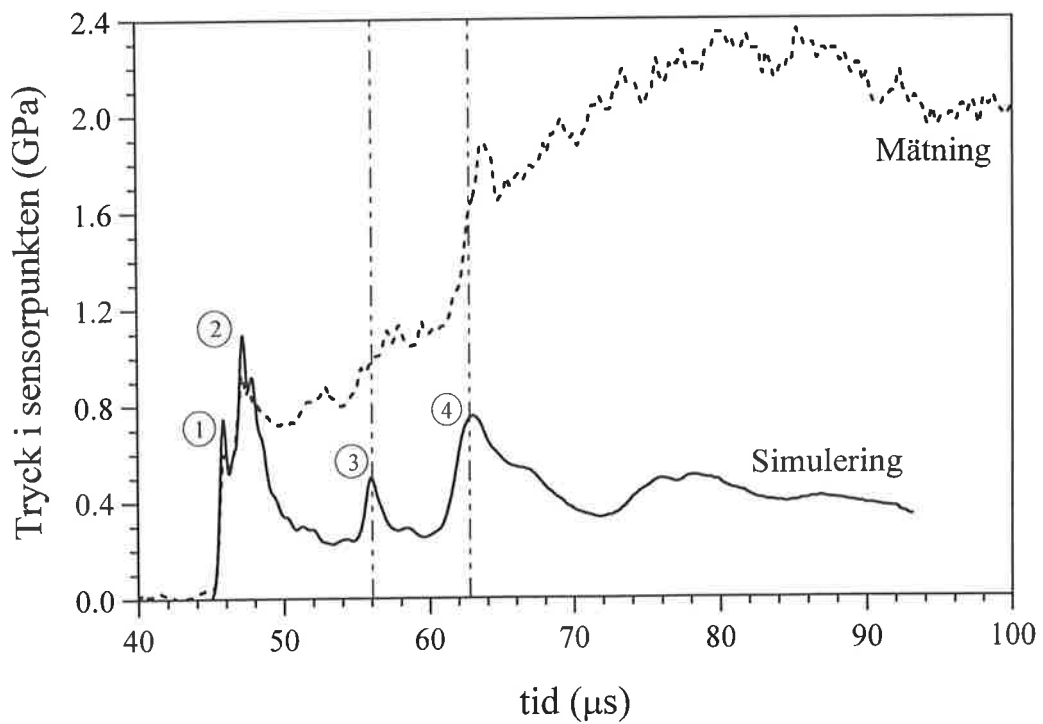
Skillnaden i varaktighet härrör sannolikt ifrån skillnaden på blockstorlek. Blocket i fältmätningen var 2,2x2,0x1,33 m vilket är mycket större än blocket i simuleringen  $\phi$ 1x1 m och blockstorlek är helt avgörande för tryckvaraktighet, se Figur 22.

Skillnaden i amplitud är svårare att förklara. Den kan bero på flera saker. Säkert bidrar den förenklade givarekonstruktionen i simuleringen till skillnaden. Dels uteblir den starka men kortvariga reflektionen från LHM:s nedre hörn för att hörnet inte rymdes i simuleringen. Ankomsten av hörnreflektionen i Figur 25 har identifierats tidigare, se Figur 23b. Dels kunde inte LHM-koppens stålvägg inkluderas i simuleringen. Vattenvolymen är därför mycket större i simuleringen än i fältmätningen. Ändå kan de två ovannämnda faktorerna inte förklara hela skillnaden.

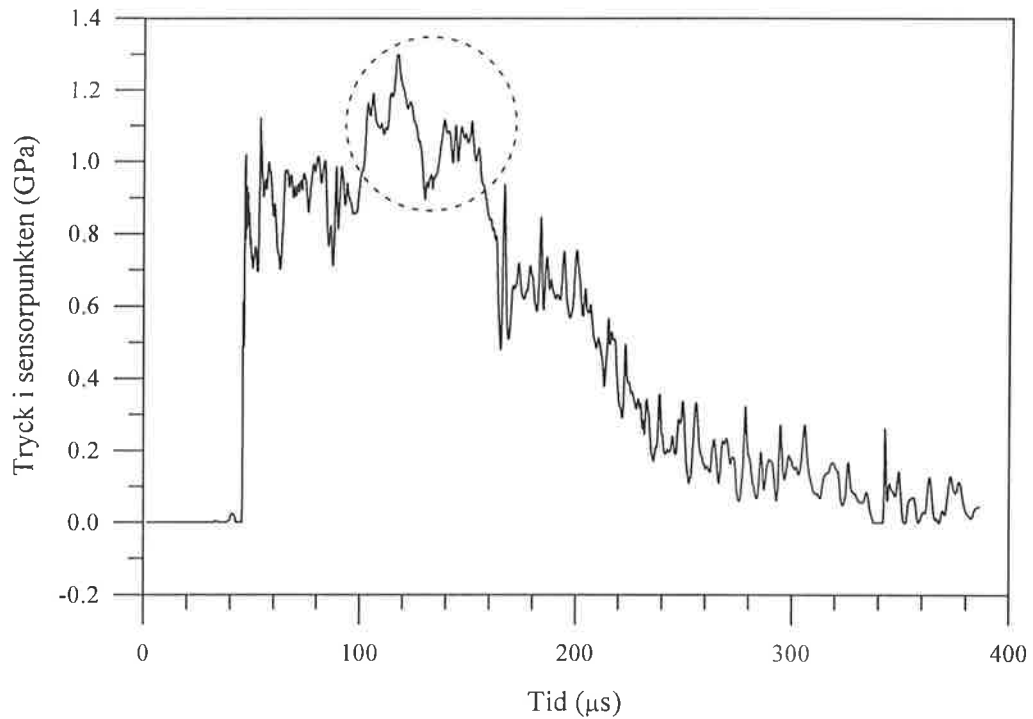
En annan inflytelserik parameter är bergets materialegenskaper, som har hämtats från litteraturer. En kontrollberäkning visar att variationer i vissa av bergets materialegenskaper, t ex flytspänning, starkt påverkar den beräknade tryckamplituden.



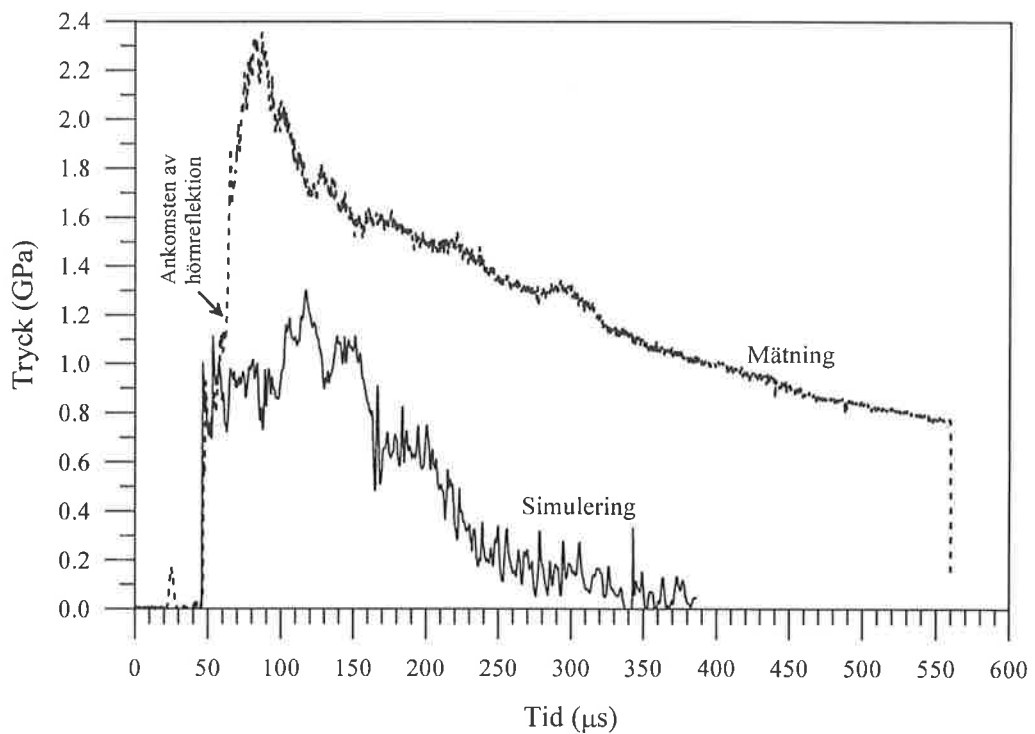
Figur 23a: Beräkningsresultat från en inledande simulering vars uppställning visades i Figur 19.



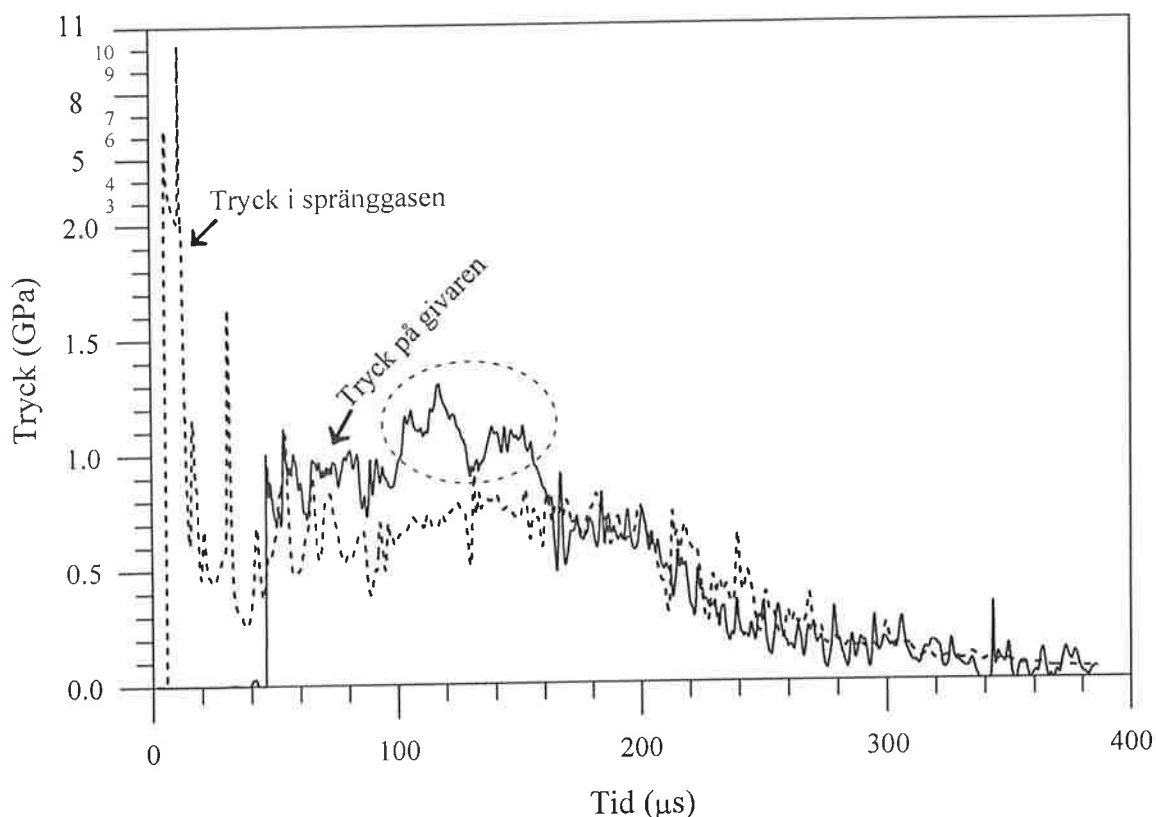
Figur 23b: Beräkningsresultat från en inledande simulering vars uppställning visades i Figur 19 jämfört med mätresultatet.



Figur 24: Beräknad tryckregistrering från en simulering vars uppställning visades i Figur 20.



Figur 25: Beräknad tryckregistrering enligt simuleringssuppställning i Figur 20 jämfört med fältmätningen.



Figur 26: Jämförelse av trycket registrerat av givaren med trycket i spränggasen i sprängborrhålet.

#### Relation mellan registrerat tryck och trycket i spränggasen i borrhål

En viktig uppgift med simuleringen är att förstå vad givaren mätte och hur mätresultatet förhåller sig till borrhålstrycket. Därför jämförs i Figur 26 de två beräknade trycktidförloppen, dvs trycket i spränggasen i borrhålet, punkt 4 i Figur 20, och trycket på givarelementet i den förenklade LHM-koppen, punkt 1 i Figur 20.

Resultatet från jämförelsen i Figur 26 motsvarar förväntningarna väl. De snabba tryckpulserna efter detonationen i sprängämnet kan givaren inte registrera. De dämpas i vattnet. Däremot kan givaren mäta borrhålstrycket när trycket i spränggasen har stabiliserats och nått ett kvasi-statiskt tillstånd som definitionsmässigt motsvarar borrhålstrycket. Detta har varit designprincipen av LHM-givaren. I denna bemärkelse fungerar LHM-tekniken bra.

Ändå är skillnaden i tryckamplituden stor i vissa delar av signalerna. I det beräknade trycktidförloppet i sensorpunkten började trycket stiga igen ca 60  $\mu\text{s}$  efter den första tryckankomsten, se den inringade delen i Figurerna 24 och 26. Dessutom höll det högre trycket i sig i ca 50  $\mu\text{s}$ . Det saknas en bra förklaring till denna tryckuppgång. Överensstämmelsen i amplituden i övriga delar av signalen är mycket goda.

### Kalibrering av sprängämnets brinnmodell

Med nuvarande försök och simulering kan sprängämnets brinnmodell kalibreras genom jämförelser av två mätta respektive beräknade storheter: VOD i sprängämnet och trycket i borrhålet.

Som visades i Figur 25 är skillnaden i tryckamplitud mellan simuleringen och mätningen stor. Orsakerna till detta kan vara många och sprängämnets brinnmodell är bara en av dem. Därför kan man inte dra några slutsatser om riktigheten i sprängämnets brinnmodell. Hade vi haft en större simuleringskapacitet, skulle vi ha gått längre på denna punkt.

Däremot är överensstämmelsen med sprängämnets VOD mycket bättre. Den beräknade VOD i sprängämnet är 5290 m/s enligt Figur 20, vilket skall jämföras med den uppmätta VOD på 5712 m/s. Skillnaden är ca 7%. Denna skillnad kan bero på två fakta. Den första är noggrannheten i mätningen. Enligt Figur 2, ligger detta VOD-värde mycket högt jämfört med de andra värdena. I två senare mätningar i granitblock uppmäts VOD till 5437 respektive 5538 m/s. Det andra faktumet är bergets egenskaper i beräkningen. En kontrollberäkning visar att en ökning i bergets flytspänning ökar VOD-värdet betydligt.

En tidigare simulering av detonation i ett stålrör visade ännu bättre överensstämmelse i VOD, beräknad VOD på 5813 m/s mot uppmätt VOD på 5798 m/s, se Avsnitt 2.2.6.

Det betyder att brinnmodellen åtminstone kan någorlunda korrekt hantera beskrivningen av förbränningen i sprängämnet före CJ-planet, dvs den delen av reaktion som bidrar till detonationens fortplantning.

## 5 Slutsatser och diskussion

Rapporten har beskrivit en lång serie av experiment och datorsimuleringar. Experimenten sträcker sig från laborieförsök för bestämning av sprängämnets brinnmodell till sprängförsök i rörladdningar, i stora granitblock och i kalkstenspall. Simuleringarna omfattade framtagning av parametervärden till brinnmodellen och återgivning av sprängförsöken. Dessutom omfattar rapporten en litteraturstudie av kalibrering av kolmotstånds tryckkänslighet.

### Följande slutsatser kan dras från utförda experiment

- Forskningsprängämne Emulsion 682 har karaktäriserats. Egenskaper som densitet, viskositet, VOD:s och krökningsradiens diameterberoende, Hugoniot-samband och tillståndsekvationen för matrisen samt VOD i flera inneslutningsmaterial har mätts.
- Användning av LHM-givaren i stenblock och pallsprängning har lyckats. En försöksuppställning för tryckmätning i borrhål i pallsprängning har utvecklats efter flera inledande försök.
- Mätningen av borrhålstrycket i ett  $\phi$  37 mm fulladdat hål i ett granitblock visade ett högsta tryck på 2,3 GPa och en varaktighet på 514  $\mu$ s. VOD i laddningen mättes till 5712 m/s.
- Mätningen av borrhålstrycket i ett  $\phi$  37 mm hål i ett granitblock laddat med en  $\phi$  21,2 mm rörladdning visade ett högsta tryck på 0,55 GPa och en varaktighet på 745  $\mu$ s. VOD i laddningen mättes till 4756 m/s.
- Dessa mätningar visade att LHM-givaren har en lång svarstid, ca 30 ~ 40  $\mu$ s.
- Dessa mätningar visar också att borrhålstrycket minskar drastiskt med laddningens frikoppling.
- Mätningen av borrhålstryck i ett fulladdat  $\phi$  89 mm hål i en kalkstenspall visade ett högsta tryck på ca 5 GPa och en varaktighet på ca 96  $\mu$ s. VOD i laddningen mättes till 5453 m/s. Vibrationsmätningen i samband med tryckmätningen visade mycket höga accelerationer i berget.

### Följande slutsatser kan dras från simuleringarna

- En brinnmodell har framtagits för sprängämne Emulsion 682 genom analys av mätdata med program DYNA2D. Simuleringarna av sprängningar i stålrör och i granitblock visade att brinnmodellen kan korrekt beskriva detonationsförloppet före CJ-planet, dvs den delen av reaktion som bidrar till detonationens fortplantning.



Modellens beskrivning av reaktionerna efter CJ-planet har dock inte kunnat verifieras med nuvarande simuleringskapacitet.

- SveBeFo:s nuvarande simuleringskapacitet är för begränsad för att kunna beräkna borrhålstryck i fältförsöken med tillfredsställande noggrannhet. Ändå kan en hel del detaljer i fältförsöket simuleras och principiella slutsatser kan dras.
- Vågrörelserna i vattnet i LHM-koppen har studerats och vågreflektioner och vågsuperponeringar kan identifieras. Överensstämmelsen mellan simuleringen och mätningen är i detta avseende mycket god.
- Simuleringen av sprängförsöken i granitblock visade att blockstorleken har en avgörande betydelse för trycktidförloppet i borrhålet. Ju större block, desto längre tryckvaraktighet och långsammare tryckfall i borrhålet.
- Skillnaden mellan simulerad och mätt tryckamplitud är stor. Exakt orsak till detta kan inte identifieras pga den begränsade simuleringskapaciteten.
- Jämförelse mellan trycket inne i spränggasen och trycket på sensorn inne i LHM-koppen visade att LHM-givaren med sin konstruktion kan mäta det kvasi-statiska trycktillståndet i borrhålet efter detonationens passage.

#### Både experimenten och simuleringarna bekräftade följande:

- Inspänningen av borrhål t ex i form av bergmassa runt hålet, påverkar starkt såväl trycktidförloppet i sprängborrhålet som LHM-givarens prestanda. Ju mer inspänt ett borrhål är, desto längre tryckvaraktighet, desto långsammare tryckfall och desto snabbare tryckutjämning inne i LHM-kroppen.
- LHM med nuvarande konstruktion har en lång svarstid gentemot borrhålstrycket, vilket innebär att den första delen av trycket inte kan registreras korrekt.

#### Diskussion

Fältförsöken som beskrivits i rapporten är komplicerade och kostsamma. Därför är försöksantalet begränsat. Ingen annan har lyckats mäta borrhålstryck i botten av ett fulladdat sprängborrhål, enligt vår kännedom. Det saknas därför underlag till statistisk analys av mätresultaten och till jämförelse med andra experimentella data.

Försöken och simuleringarna har visat att LHM-metodiken fungerar. Dock är svarstiden hos LHM-givaren lång och den kan inte följa initialdelen av trycktidförloppet. Denna svarstid kan förkortas med flera åtgärder. T ex kan LHM-koppen förkortas så att vattenpelaren blir kortare och sensorn kommer närmare spränggaserna. Å andra sidan får inte koppen vara hur kort som helst. Givaren måste ju överleva tillräckligt länge för

att mäta trycktidförloppet. Den andra åtgärden är att ersätta vattnet med ett material som har högre våghastighet och på så sätt reducera vågens gångtid i materialet. En givarkonstruktion liknade den som används i /7/ kan då bli aktuell, där givaren har gjutits in i aluminiumcylinder med epoxi.

Simuleringarna har brottats med brist på kapacitet. Vi behöver större simuleringskapacitet för fortsatta arbeten. En annan svårighet i branschen är den begränsade tillgången på materialdata för berg. Än så länge får vi förlita oss på de få data som finns i litteraturen. Det skulle vara önskevärt att utföra materialtest på eller till och med utveckla materialmodeller för de bergarter vi gör instrumenterade fältförsök i.

En ännu större svårighet i simuleringarna ligger i att DYNA2D är en FEM kod som bara kan hantera material som ett kontinuum. Vid borrhålexpansion spricker berget kort efter sprängämnets detonation. Ändå måste berget i simuleringarna behandlas som ett kontinuum. Hur mycket det har påverkat våra beräkningsresultat är okänt.

Genom försöken och simuleringarna har vi kommit ett steg närmare en förståelse av sprängämnens expansionsarbete i borrhål. På den mättekniska sidan har vi utvecklat utrustning och skaffat oss erfarenheter för mätning av borrhålstrycket. På simuleringsidan har vi utvecklat metodiken för framtagning av brinnmodeller och simulering av fältförsök.

## Erkännande

Flera personer har varit delaktiga i projektet och bidragit till projektets framgång. Deras insatser redovisas nedan.

Shulin Nie har ansvarat för alla experimentella arbeten utom Hugoniot-försöket i Bilaga 3 (planering, tillverkning av LHM-givarna, labbförsöksuppställningar och laddustrustningen för emulsion, utförande av försöken samt analysering av resultaten), utfört beräkningarna med programmet Cheetah, skrivit JWL-anpassningsprogrammet JWL9 och använt detta för framtagningen av JWL-tillståndsekvationerna för såväl oreagerat sprängämne som spränggaser, utfört litteraturstudien av givarkalibrering, varit delaktig i datorsimuleringar av blockförsök med programmet DYNA2D samt skrivit rapporten.

Junhua Deng har ansvarat för samtliga simuleringar med programmet DYNA2D (analysering av Hugoniot-försöket, framtagning av brinnmodell och simuleringar av sprängningarna i stålrör och i granitblock), ansvarat för Hugoniot-försöket (planering, tillverkning av uppställningar, utförande och analysering), varit delaktig i alla experimentella arbeten samt varit delaktig i rapportskrivningen.

Finn Ouchterlony har ansvarat för projektadministration, diskussioner om resultatens kvalitet och rimlighet samt diskussion om rapporteringen.

Ulf Nyberg har deltagit i en serie av VOD-mätning i PVC-rörladdningar och två fältförsök i kalkstenspallen.

Lena Reidarman har deltagit i ett fältförsök i Luddens stenbrott.

Björn Engsbråten på Dyno Nobel AB har ansvarat för tillverkning av Emulsion 682.

Dessutom skulle författarna vilja tacka följande personer och företag för deras insatser till arbetet beskrivet i rapporten.

Björn Engsbråten på Dyno Nobel AB och Hans Karlström på Kimit AB för deras rådgivning i frågor rörande emulsionssprängämne. Sven-Inge Nilsson på Skanska Sydöst AB för ordnande av försöksplatsen i Ludden granitstenbrott. Åke Hellenberg på Partek Nordkalk Storugns AB för hans hjälp under fältförsöken i Storugns kalkstensbrott. Bo Alexandersson på Göinge Stenförädling AB för hans hjälp under alla försök i granitblock i Svenneby stenbrott. Ian Easton på Lubrizol Limited för ordnande av emulgator LZ 5691D och dess egenskapsdata. Hans Ekberg på Mobil Oil HB för materialdata till olja Whiterex 309. Skanska Sydöst AB för tillåtelse av försöksplatsen och hålbormingen i Ludden granitstenbrott. Partek Nordkalk Storugns AB och Göinge Stenförädling AB för tillåtelser att använda deras dagbrott respektive stenbrott för fältförsöken. Dyno Nobel AB för försörjning av sprängämne Emulsion 682. Lubrizol Limited för försörjning av emulgator LZ 5691D.

## Referenser

1. Lee E L och Taver C M: "Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives". *Phys. Fluids* 23 (12), sid. 2362-2372. Dec., 1980.
2. Kirby I J och Leiper G A: "A Small Divergent Detonation Theory for Intermolecular Explosives". 8th International Symposium on Detonation, sid. 176-186. Albuquerque, New Mexico. 1985.
3. Lee J: "Detonation Shock Dynamics of Composite Energetic Materials". Ph.D. Thesis. New Mexico Tech., Socorro, New Mexico. Dec., 1990.
4. Kennedy D L och Jones D A: "Modelling Shock Initiation and Detonation in the Non-ideal Explosive PBXW-115". 10th International Symposium on Detonation, sid. 665-674. Boston, USA. Jul. 1993.
5. Deng J, Nie S och Chen L: "Determination of Burning Rate Parameters for an Emulsion Explosive". SveBeFo Report 17. 1995.
6. Ito I och Sassa K: "On the Detonation Pressure Produced at the Inner Surface of a Charge Hole". *Proceedings of the International Symposium on Mining Research*. Vol. 1. sid. 103-124. University of Missouri. Feb., 1961. Pergamon Press. Oxford. London. New York. Paris. 1962.
7. Wilson W H, Holloway D C och G Bjarnholt: "Measurement of Pressure Loadings from Explosively Loaded Boreholes used Expendable Piezoresistive Transducers". *Proceedings of the 1987 American Society of Mechanical Engineers Meeting*, Cincinnati, Ohio, USA. Jun. 14-17, 1987.
8. Davies F W, Smith E A och De La Cruz C: "The Measurement of Detonation Waves in Composite Explosives". *Proceedings of the 13th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research*. International Society of Explosives Engineers. sid. 145-159. Las Vegas, Nevada, USA. Feb. 2-5, 1997.
9. Persson G: "LHM, en metod för mätning av hela trycktidförloppet i sprängborrhål". SveBeFo Rapport 34. 1999.
10. Nie S: "Borehole Pressure in Blast Holes - Measurements in granite blocks versus estimations". SveBeFo Report 42. 1999.
11. Fried L E: "Cheetah 1.39 User's Manual". Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-MA-117541 Rev. 3. Mars 19, 1996.
12. Ginsberg M J och Asay B W: "Commercial carbon composition resistors as dynamic stress gauges in difficult environments". *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 62, No. 9, sid. 2218-2227. Sept., 1991.

13. Cooper P W: "Explosives Engineering". VCH Publishers, Inc. 1997.
14. Marsh S P: "LASL Shock Hugoniot Data". University of California Press. Berkeley. Los Angeles. London. 1980.
15. Dobratz B M och Crawford P C: "LLNL Explosives Handbook - Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants". University of California, Livermore, CA. Jan. 1985.
16. Johnson G R och Cook W H: "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures". 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, The Netherlands. April, 1983.
17. Kinslow R: "High-Velocity Impact Phenomena". Academic Press. New York and London. 1970.
18. Lama R D och Vutukuri V S: "Handbook on Mechanical Properties of Rocks". Vol. II. Trans Tech Publications. 1978.
19. Deng J: "DYNA2D User's Manual (PC-version). SveDeFo (Stiftelsen Svensk Detonikforskning) Report DU 1991:9. 1991.

### Bilaga 1: Mätning av VOD i sprängämne Emulsion 682

VOD har mätts både i rörladdningar och i borrhål i berg. Rörladdningarna består av PVC-rör och stålrör. Tjockleken på PVC-rören varierade mellan 1,2 mm och 4,5 mm beroende på laddningsdiameter och tjockleken på stålröret var 3,6 mm. Sammanlagt har 35 VOD-mätningar erhållits i PVC-rörladdningar, en i stålrörladdning, två i granitblock och en i kalkstenspall.

Mätningarna i borrhål i berg utfördes i samband med de fältförsök som beskrevs i Avsnitt 3.

Mätningarna i rörladdningar har utförts i två försöksserier. I den första serien erhöll 21 mätningar i PVC-rör och en i stålrör. Instrumentet MiniTrap, tillverkat av MREL i Kanada, har använts. Mätsonden är en så kallad VOD Probe, en 0,9 m lång smal men styv motståndspinne med ett jämnt fördelat motstånd på 322,5  $\Omega$ /m. Mätsonderna placerades inuti rörladdningar. Mätresultaten redovisas i Tabell B1 a) och Figur B1.

Den andra serien utfördes i samband med fotografering av detonationsfronter hos olika PVC-rörladdningar. Försökets uppställning finns beskriven i en SveBeFo Rapport /B1/. En mätmetod utvecklats på SveBeFo /B2/ har använts. Den är baserad på ett digital oscilloskop, en strömkälla med konstant spänning och en VOD Probe. Emellertid placerades VOD sonden utanpå rörladdningarna för att den inte skulle störa mätningen av krökning hos detonationsfronten. Mätresultatet redovisas också i Tabell B1 c) och Figur B1.

Primern för initieringen har varierats allt från 10 g pressad PETN eller TNT till 2 st MAXIPRIME med var och en 50 g pressad PETN och TNT beroende på laddningsdiameter. Någon större run-up eller run-down strecka har inte synts i mätresultaten och VOD-värdena beräknades på streckor med stabil detonation nära slutet av laddningarna. Det innebär att primerns eventuella inverkan på VOD kan försummas.

Det framgår av Figur B1 att spridningen i VOD mätvärdena finns både inom samma mätserie och mellan mätserierna. De största procentuella spridningarna finns hos de mindre laddningsdiametererna. Skillnaden i förfarande mellan två mätserier är placeringen av mätsonderna, inuti eller utanpå laddningarna. Därför utfördes en kontrollmätning där två mätsonder användes samtidigt för en PVC-rörladdning, en inuti och en utanpå laddningen. Laddningsdiametern var 20,5 mm. Resultatet redovisades i Tabell B1 d) and Figur B2. Man kan konstatera att mätresultaten från båda sonderna ligger inom 50 m/s dvs inom ca 1,0%. Överensstämmelsen är alltså mycket god.

Tabell B1: Resultatet över samtliga VOD mätningar i sprängämne Emulsion 682

## a) Mätning i PVC-rör

Laddnings-		PVC-rör tjocklek (mm)	VOD (m/s)
diameter (mm)	längd (mm)		
13,6	246	1,25	3896
17,0	245	1,5	4418
17,0	207	1,5	4242
20,5	497	2,25	4602
20,5	497	2,25	4497
27,0	500	2,5	4916
27,2	582	2,5	4921
33,8	495	3,1	5167
34,6	497	2,7	5166
45,2	495	2,4	5479
45,2	495	2,4	5405
56,8	495	3,1	5655
56,8	495	3,1	5532
67,5	495	3,75	5731
67,8	495	3,6	5751
81,4	805	4,3	5707
84,0	1150	4,5	5734
84,0	1200	4,5	5748
105,6	770	2,2	5762

## b) Mätning i stålrör

Laddnings-		Stålrör tjocklek (mm)	VOD (m/s)
diameter (mm)	längd (mm)		
68,6	740	3,6	5798

## c) I samband med mätning av krökning

Laddnings-		PVC-rör tjocklek (mm)	VOD (m/s)
diameter (mm)	längd (mm)		
13,6	205	1,2	4170
13,6	205	1,2	4126
17,0	205	1,5	4336
17,0	205	1,5	4463
20,5	280	2,15	4469
20,5	280	2,15	4364
27,0	313	2,55	5140
27,0	313	2,6	5023
34,0	495	3,0	5294
34,0	504	2,9	5348
45,2	475	2,5	5456
56,8	632	3,1	5523
67,8	641	3,6	5689

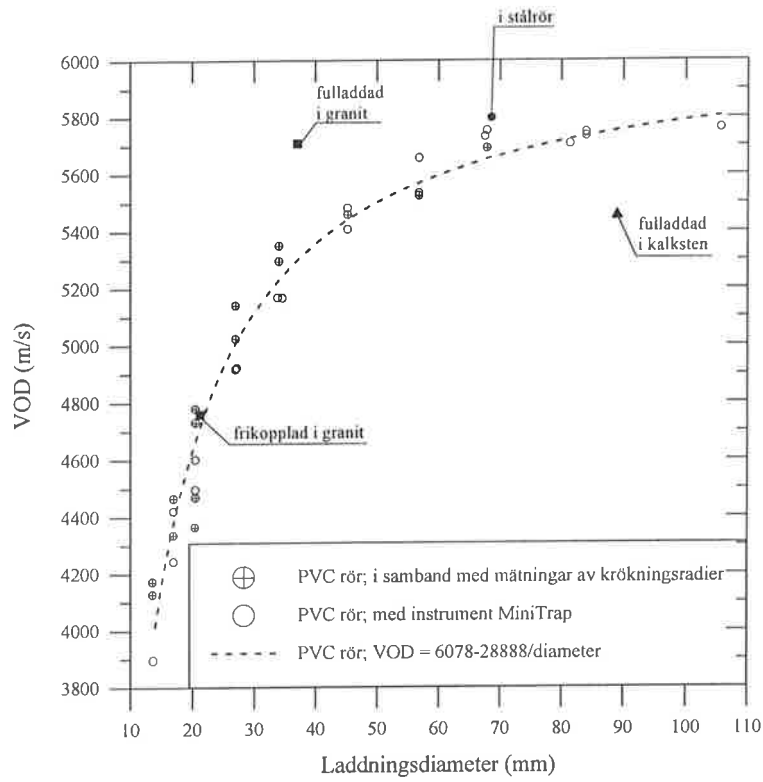
## d) Kontrollmätning med två Probe

Laddnings-		PVC-rör tjocklek (mm)	VOD (m/s)
diameter (mm)	längd (mm)		
20,5	470	2,25	4780 <sup>i</sup>
20,5	470	2,25	4731 <sup>u</sup>

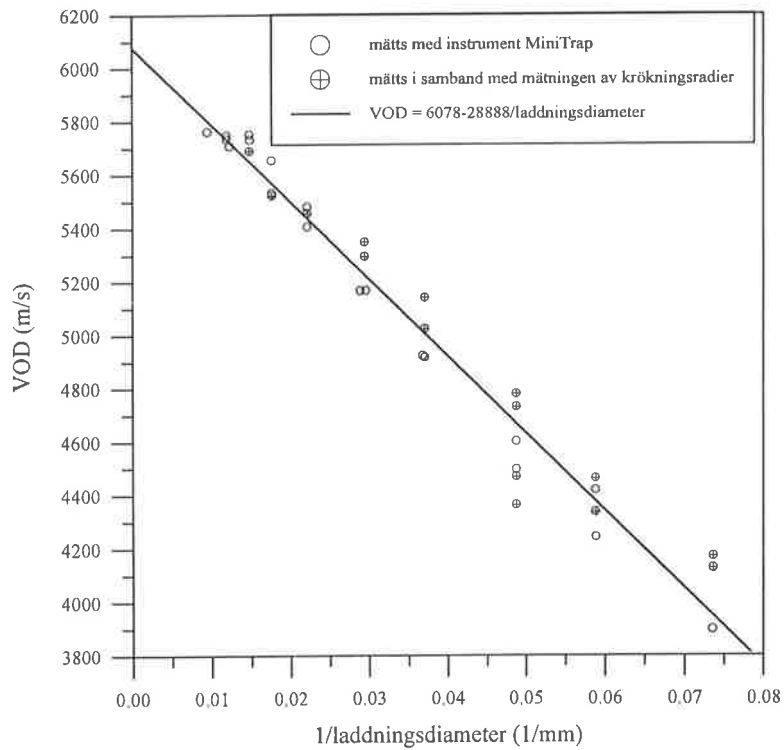
## e) Mätning i berg

Laddnings-		Inneslut- ning	VOD (m/s)
diameter (mm)	längd (mm)		
21,2	0,28	luft/granit*	4760
37	0,355	granit	5710
89	0,8	kalksten	5453

- a) Mätningar i laddningar i PVC-rör med MiniTrap-instrument och mätsonderna placerades inuti laddningarna
- b) Mätning i laddning i stålrör med MiniTrap-instrument och mätsonden placerades inuti laddningen
- c) Mätningar med egen metod i samband med fotografering av detonationsfronter i PVC-rörladdningar och mätsonderna placerades utanpå laddningarna
- d) Mätning med egen metod i en PVC-rörladdning där två mätsonder användes, en inuti och en utanpå laddningen. i = mätsonden inuti laddningen. u = mätsonden utanpå laddningen
- e) Mätningar med egen metod i borrhål i berg. \* = frikopplad laddning och laddningsdiameter/håldiameter = 21,2/37



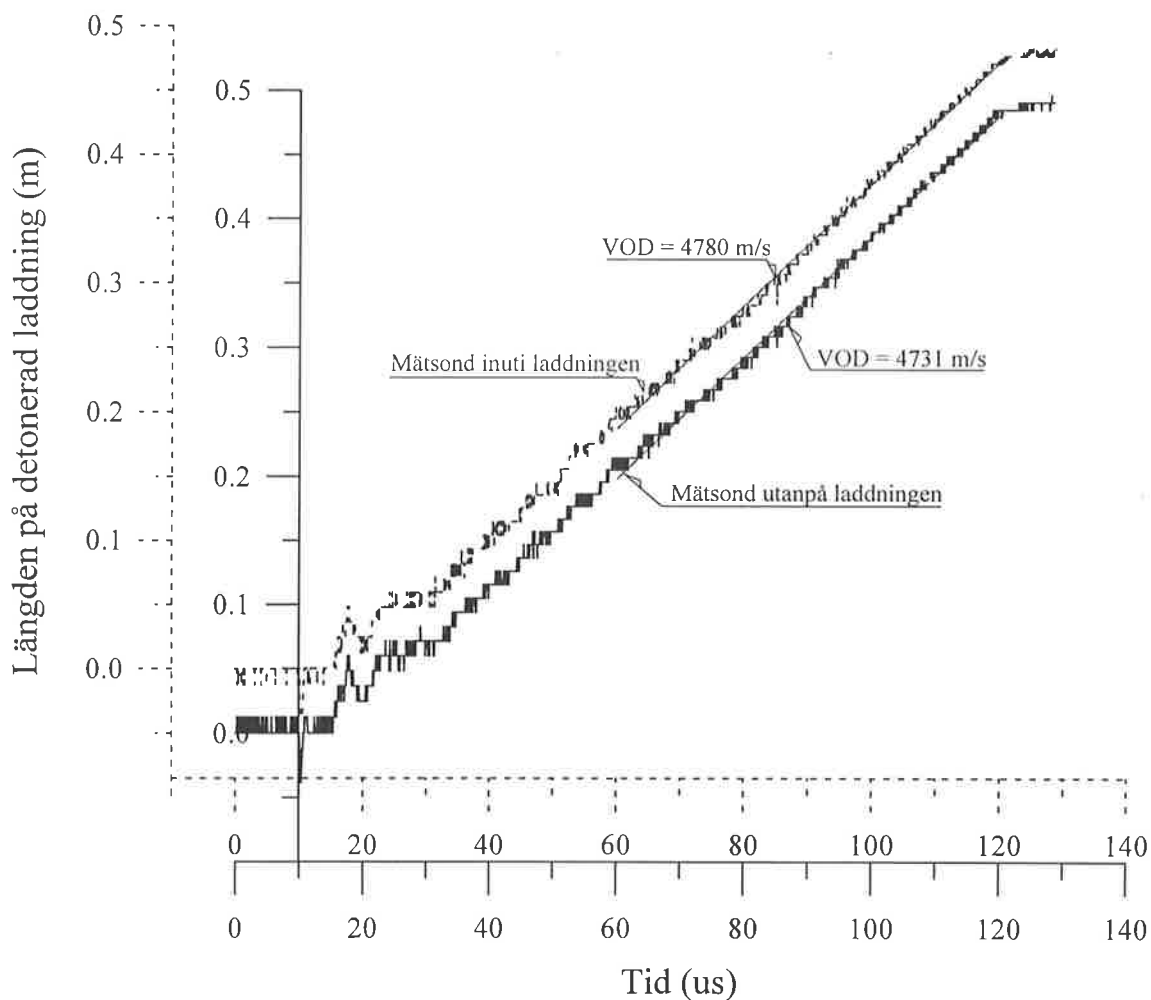
Figur B1 a): Samtliga VOD mätningar i sprängämne Emulsion 682.



Figur B1 b): VOD hos sprängämne Emulsion 682 laddat i PVC-rör.



Samtliga VOD mätningar i PVC-rörladdningar, dvs resultat i Tabell B1 a), c) och d, har använts för att bestämma VOD som funktion av invers laddningsdiameter med regressionsanalys. Resultatet ges av ekvation 1 i Avsnitt 2.2.2. I Figur B1 a) plottas dock alla VOD-mätningar, dvs alla resultat i Tabell B1.



Figur B2: Jämförelse mellan VOD mätningar från två mätsonder som använts för samma PVC-rörladdning. En sond placerades inuti och en utanpå laddningen. Observera att y-axlarna har förskjutits något för att synliggöra båda signalerna.

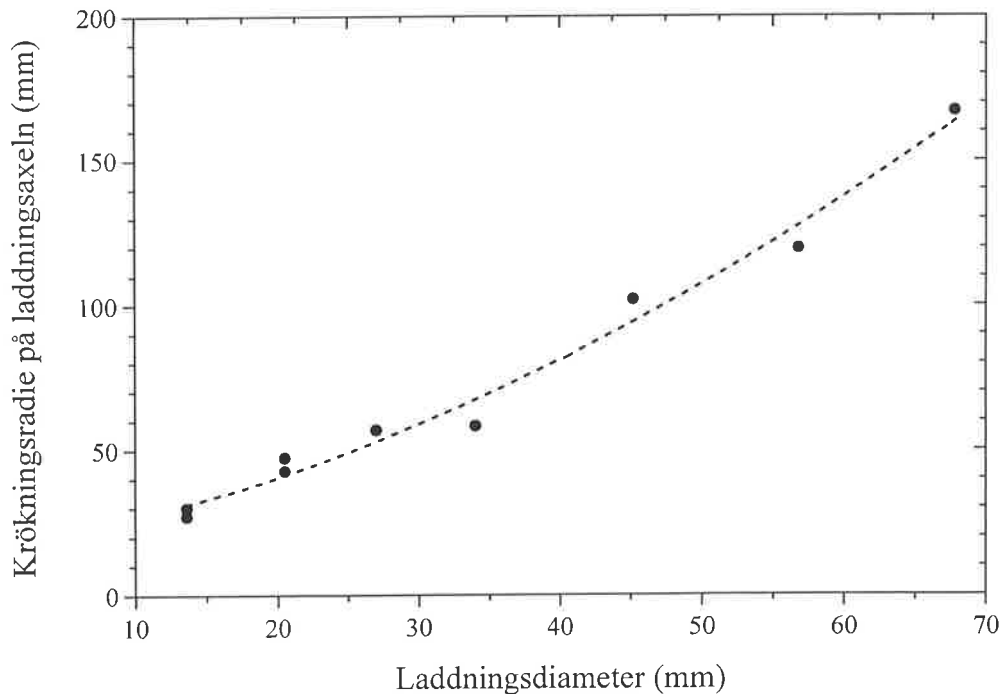
## Bilaga 2: Mätning av krökningsradier hos detonationsfronter i sprängämne Emulsion 682

Krökningen hos detonationsfronten mättes med en fotografisk metod. Metoden har beskrivits i tidigare SveBeFo rapporter /B1, B3/ men principen beskrivs ändå nedan.

Detonationsfronten i Emulsion 682 är krökt. I en rörladdning har fronten en paraboloidliknande form, eller enklare uttryckt en parabolantennliknande form, vars rotationsaxeln ligger i laddningsaxeln och spetsen riktar åt detonationsriktningen. När detonationen kommer till laddningens ändyta, träffar paraboloiden ändytan successivt med spetsen först. Med hjälp av en höghastighetskamera, Cordin 116 med en svepbildsmodul, fotograferas paraboloidens ankomst till laddningens ändyta kontinuerligt och en spegelbild av paraboloiden avbildas på filmen.

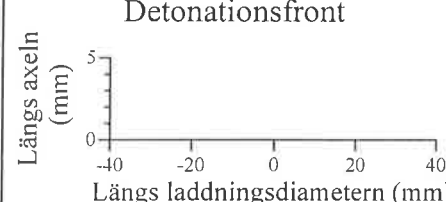
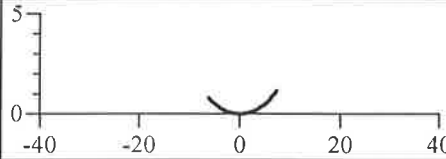
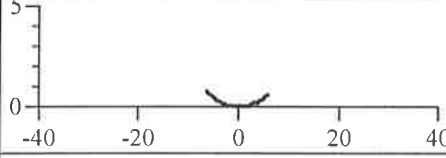
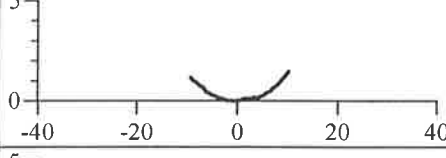
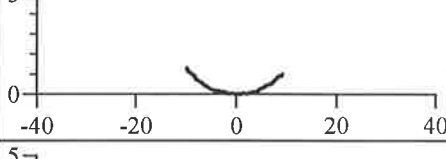
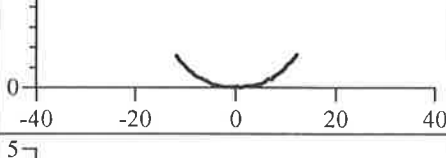
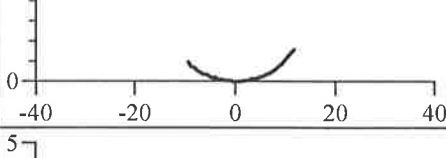
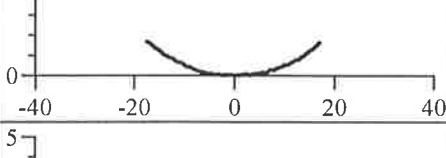
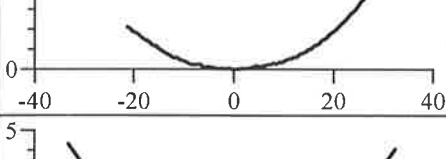
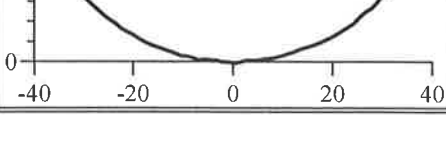
Fotot på paraboloiden digitaliseras, en kurvanpassas och krökningsradien på laddningsaxeln beräknas enligt de procedurer som beskrevs i /B1/.

För Emulsion 682 har detonationsfronter fotograferats i 14 PVC-rörladdningar med laddningsdiametrar mellan 13,6 och 67,8 mm. Tjockleken på PVC-rör varierades mellan 1,2 och 3,6 mm. Av de 14 försöken erhöles 9 foton av mycket god kvalitet. De 9 foton ingick i vidare analyser och resultatet redovisas i Tabell B2. Krökningsradierna hos detonationsfronterna på laddningarnas axlarna redovisas som en funktion av laddningsdiametern i Figur B3.



Figur B3: Detonationsfrontens krökningsradie på laddningsaxeln som en funktion av laddningsdiametern.

Tabell B2: Mätning av detonationsfrontens krökning hos sprängämne Emulsion 682.

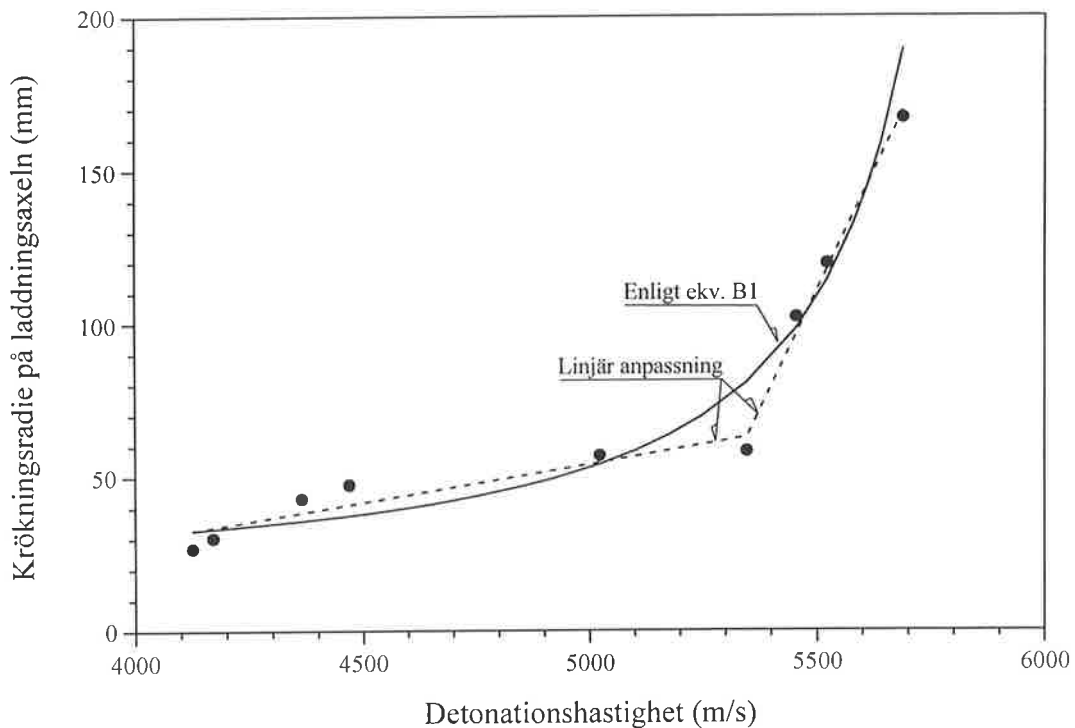
Laddnings-		PVC-rör tjocklek (mm)	VOD i laddning (m/s)	Kröknings- radie på axeln (mm)	Detonationsfront 
diameter (mm)	längd (mm)				
13,6	205	1,2	4126	27,03	
13,6	205	1,2	4170	30,25	
20,5	280	2,15	4364	42,78	
20,5	280	2,15	4469	47,44	
27,0	313	2,6	5023	56,70	
34,0	504	2,9	5348	58,13	
45,2	475	2,5	5456	102,0	
56,8	632	3,1	5523	119,5	
67,8	641	3,6	5689	166,9	

Resultatet bekräftar den generella observationen att krökningsradien ökar med laddningsdiametern. Med andra ord, ju större laddningsdiameter, desto planare detonationsfront och högre detonationshastighet (VOD). Sambandet mellan krökningsradien och VOD i ekvation B1 kan erhållas indirekt genom att kombinera ekvationerna 1 och 2. I Figur B4 plottas krökningsradien som en funktion av VOD.

$$R_0 = 15,89 + 24265,9 / (6078 - \text{VOD}) + 16690330,9 / (6078 - \text{VOD})^2 \quad (\text{B1})$$

Här är:  $R_0$  = krökningsradien hos detonationsfront mätt på rörladdnings axeln (mm)  
 VOD = detonationshastighet (m/s)

Krökningsradiens beroendet av VOD syns tydligt i Tabell B2 och i Figur B4. Krökningsradien ökar monotont med ökande VOD. Även tidigare mätningar i andra sprängämnen visar detta beroende /B3/.



Figur B4: Detonationsfrontens krökningsradien på laddningsaxeln som en funktion av laddningens VOD.

Särskilt intressant är de upprepade mätningarna på samma laddningsdiameter, dvs diametrarna 13,6 och 20,5 mm, se Tabell B2. Trots samma diameter är krökningsradien något annorlunda vid de olika försöken. Det beror på variationen i VOD-värde mellan laddningarna. Krökningsradien följer VOD-värdets variation och öka även då med ökande VOD!

Betyder detta att krökningsradien på laddningsaxeln är entydigt beroende av VOD dvs oberoende av laddningsdiameter eller inneslutning? Skulle denna slutsats vara giltig, skulle det ha en oerhört stor praktiska betydelse. Till exempel innebär detta att detonationsfronten i ett mindre borrhål i berg skulle ha precis samma kröning som i en större laddning i PVC-rör om VOD i båda fall är den samma! Med andra ord kan man bestämma krökningsradien i borrhål med en VOD mätning i borrhål och en motsvarande krökningsmätning i laboratorium.

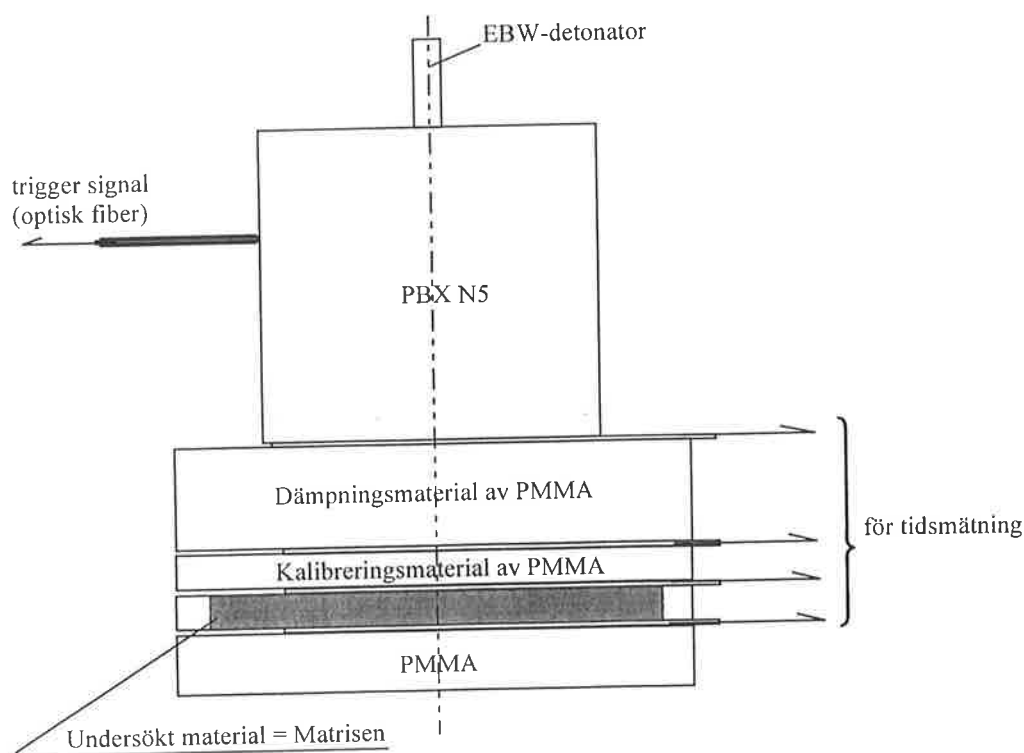
Att verifiera den ovannämnde slutsatsen kräver förmodligen många dyra experiment.

### Bilaga 3: Tillståndsekvation för oreagerat sprängämne

Tillståndsekvationen för oreagerad Emulsion 682 har bestämts i tre steg. Först har Hugoniot-sambandet för matrisen bestämts experimentellt. Sedan beräknades Hugoniot-sambandet för oreagerat sprängämne med hjälp av blandningsregeln för den blandning av matrisen och mikroballonger som motsvarar sprängämnets komposition. Till sist beräknades tillståndsekvationen för det oreagerade sprängämnet baserat på dess Hugoniot-sambandet.

Metoden för experimentell bestämning av matrisens Hugoniot var en så kallad impedansanpassningsmetod. En stötvåg tillåts fortplantas genom två närliggande materialskikt. Det första skiktet är ett kalibreringsmaterial med känd Hugoniot och det andra skiktet är det material man undersöker. Tillståndet i båda materialen mäts under stötvågens passage. Genom att variera stötvågens amplitud erhåller man en serie mätningar av olika tillstånd i det undersökta materialet. Hugoniot-sambandet i det undersökta materialet fås genom kurvanpassning av mätdata.

Figur B5 visar vår försöksuppställning. Plexiglas (PMMA) användes som kalibreringsmaterial. Stötvågen, som genereras av ett sprängämne med kända egenskaper, pressad PBX N5 cylinder, passerar först ett dämpningsmaterial av PMMA innan den träffar kalibreringsmaterialet. Genom att variera tjockleken på dämpningsmaterialet regleras stötvågens amplitud i kalibreringsmaterialet. En detaljerad beskrivning av försökets uppställning finns i /B1/ och /B4/.



Figur B5: Försöksuppställning för bestämning av Hugoniot-sambandet hos matrisen.

Stötvågens gångtider genom kalibreringsmaterialet PMMA och matrisen mättes. Mätdata ges i Tabell B3.

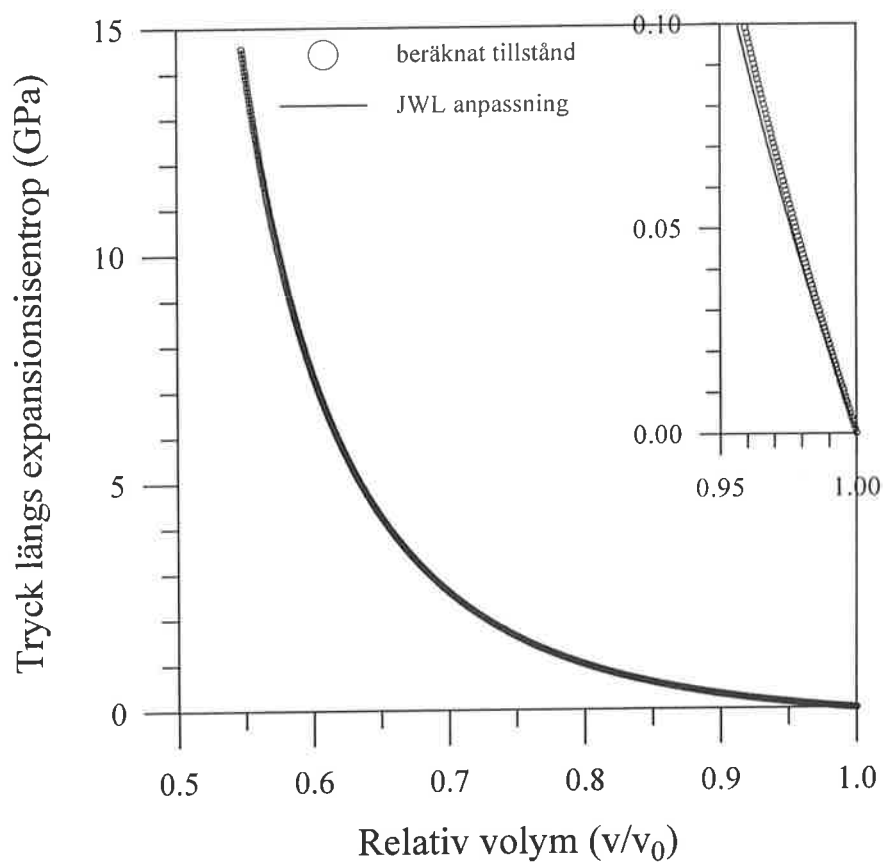
Tabell B3: Mätdata från bestämning av Hugoniot-sambandet hos matrisen i Emulsion 682.

Tjocklek på PMMA skikt (mm)	Stötvågens gångtid genom PMMA-skikt (ns)	Tjocklek på matrisskikt (mm)	Stötvågens gångtid genom matrisskikt (ns)
24,85	4424	5,10	1110
4,15	658	2,00	374
19,65	3376	2,00	414
70,30	15376	9,80	3836
39,80	7544	19,80	4994
69,35	15028	2,00	730
39,65	7620	5,05	1050
4,20	674	5,05	1052
10,20	1584	9,85	1802
49,70	9860	2,00	540
69,95	15194	5,00	1628
39,95	7572	9,75	2310

Försöket simulerades sedan med DYNA2D. Matrisens Hugoniot-parametrar justeras i simuleringen tills beräknade gångtider genom matrisen överensstämmer med de mätta. Gångtiderna genom kalibreringsmaterialet PMMA användes som en kalibrering av stötvågen. Ekvation 3 i Avsnitt 2.2.4 är matrisens Hugoniot bestämt på detta sätt. En beskrivning av analysmetod med program DYNA2D finns också i /B1/ och /B4/.

Efter detta beräknas sprängämnets Hugoniot baserat på matrisens Hugoniot och blandningsreglen. Resultatet är ekvation 4 i Avsnitt 2.2.4. Vidare beräknas sprängämnets expansionsisentrop ur sprängämnets Hugoniot. Proceduren att beräkna sprängämnets Hugoniot ur matrisens Hugoniot samt att beräkna sprängämnets expansionsisentrop ur sprängämnets Hugoniot är komplicerad och beskrivs i /B1/ och /B5/.

Till sist har sprängämnets expansionsisentrop matematiskt anpassats till den JWL-form som DYNA2D kräver. Figur B 6 visar den beräknade isentropen och JWL-anpassningen till den. Anpassningen skedde med hjälp av ett egenutvecklat program, JWL9, se Bilaga 5. Allt dessa arbete leder till slutresultatet: ekvation 5 i Avsnitt 2.2.4 eller sprängämnets tillståndsekvation i JWL-form.



Figur B6: JWL-anpassning till beräknad expansionsisentroper för oreagerad Emulsion 682. Observera att skillnaden mellan den anpassade linjen och den beräknade isentropen inte syns i den större skalan utan bara i den uppförstorade delen.



#### Bilaga 4: Tillståndsekvation för spränggaser

Beräkning av CJ-tillståndet och expansionsisentropen hos detonerande Emulsion 682 vid en ideal detonation har utförts med ett termodynamiskt dataprogram Cheetah /B6/. I beräkningen används BKWR-tillståndsekvationen med konstanterna:  $\alpha = 0,5$ ;  $\beta = 0,176$ ;  $\kappa = 11,80$  ( $\text{ccK}^\alpha$ ) och  $\theta = 1850$  (K). Sprängämnets ingredienser och dess komposition redovisas i Tabell 1 i Avsnitt 2.1. Materialdata till ingredienserna som programmet Cheetah kräver samlas i Tabell B4 nedan.

Anledningen till valet av BKWR-tillståndsekvationen är att den ger bäst överensstämmelse VOD med mätta värden för VOD.

Tabell B4: Materialdata till ingredienser i Emulsion 682 för termodynamisk beräkning. Observera att enheterna är anpassade till Cheetah.

Ingrediens namn <sup>1)</sup>	Kemisk formel	Bildningsvärme (Cal/mol)	Standardvolym (cm <sup>3</sup> /mol)	Standardentropi (Cal/mol/K)
Vatten	H <sub>2</sub> O	-68315	18,02	0
AN	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-87270	46,4	0
SN	NaNO <sub>3</sub>	-101540	37,59	0
Olja	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	-161060	200,47	0
Emulgator	C <sub>6,8</sub> H <sub>13,9</sub> N <sub>0,5</sub> O <sub>2</sub>	-80439,9	147,066	0
GMB	SiO <sub>2</sub>	-217700	22,67	0

<sup>1)</sup>: se Tabell 1 i Avsnitt 2.1 för benämning.

De beräknade CJ-värdena vid en ideal detonation är:

Detonationshastighet VOD = 6022 m/s

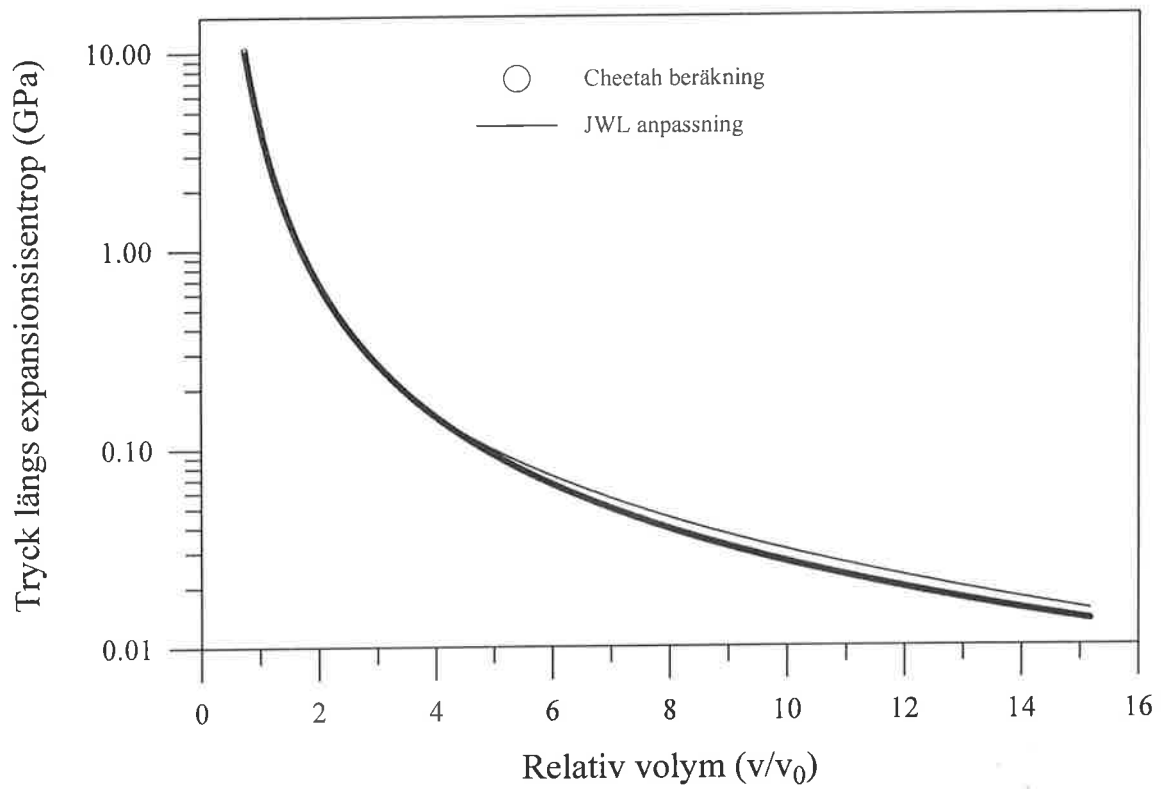
Tryck P<sub>CJ</sub> = 10,24 GPa

Specifik volym v<sub>CJ</sub> = 0,649 m<sup>3</sup>/kg

Expansionsenergi e<sub>CJ</sub> = 3,60 GJ/m<sup>3</sup>

Det beräknade VOD-värdet på 6022 m/s kan jämföras med det extrapolerade mätvärdet på 6077 m/s vid oändlig laddningsdiameter ur ekvation 1. Överensstämmelsen mellan värdena är mycket bra och skillnaden är mindre än 1%.

Med programmet Cheetah beräknades också spränggasernas expansionsisentrop från CJ-punkten. Efter det har JWJL-anpassning av isentropen utförts med hjälp av ett eget program, JWJL9, se Bilaga 5. Resultatet är ekvation 6 i Avsnitt 2.2.5. I Figur B7 jämförs Cheetah-beräkningen av isentropen med JWJL-anpassningen.



Figur B7: JWL-anpassning till Cheetah-beräkning av expansionsisotrop för Emulsion 682:s spränggaser. För att framhäva skillnaden mellan de två kurvorna plottas trycket i en log skala.

### Bilaga 5: JWL Anpassningsprogram JWL9

JWL9 är ett program skrivit av Nie för anpassning av en expansionsisentrop till JWL-form. Principen bakom programmeringen är den samma som Almströms program Anpass /B7/. Skillnaden är att JWL9 har anpassats till SveBeFo:s behov, att det skrivits på MATLAB-språk samt att det körs i Windows miljö. Beräkningsprincipen beskrivs kortfattat nedan.

JWL-tillståndsekvationen kan uttryckas i en generell form i ekvation B2 eller alternativt som tillståndet längs en isentrop i ekvationerna B3.

$$P = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \cdot e^{-R_1 V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \cdot e^{-R_2 V} + \frac{\omega \cdot E}{V} \quad (\text{B2})$$

$$P_s = A \cdot e^{-R_1 V_s} + B \cdot e^{-R_2 V_s} + C / V_s^{\omega+1} \quad (\text{B3a})$$

$$E_s = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 V_s} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 V_s} + \frac{C}{\omega \cdot V_s^\omega} \quad (\text{B3b})$$

Här är:  $P, V, E$  = tillståndsp parametrar för ett godtyckligt tillstånd  
           = tryck, specifik volym och specifik inre energi  
 $P_s, V_s, E_s$  = tillståndsp parametrar för ett tillstånd längs en isentrop  
           = tryck, specifik volym och specifik inre energi  
 $A, B, C, R_1, R_2, \omega$  = konstanter

Som framgår av ekvation B2 eller ekvationerna B3, ingår sex konstanter varav fem oberoende i en JWL-ekvation. De fem fria konstanterna blir fem fria parametrar i en matematisk anpassning, men randvillkor kan i varje tillämpning skapa extra ekvationer och sålunda minska antal fria parametrar.

Randvillkor för JWL anpassningen till spränggasens isentrop respektive till oreagerat sprängämnes isentrop är följande.

För spränggasen måste anpassningen gå genom CJ-tillståndet ( $P_{CJ}, V_{CJ}, E_{CJ}$ ), därför att CJ-tillståndet skall kunna återges av senare beräkning med DYNA2D. Av samma skäl måste anpassningen för oreagerat sprängämne gå genom starttillståndet ( $P_0, V_0, E_0$ ). Värdena på de två ovannämnda tillstånden finns i ekvationerna 5 och 6 i Avsnitt 2.2.4 och 2.2.5.

Dessa randvillkor innebär två extra ekvationer, ekvationerna B4 och B5 för spränggasen respektive ekvationerna B6 och B7 för oreagerat sprängämne.

$$P_{CJ} = P_s(V_{CJ}) \quad (\text{B4})$$

$$E_{CJ} = E_s(V_{CJ}) \quad (\text{B5})$$

$$P_0 = P_s(V_0) \quad (\text{B6})$$

$$E_0 = E_s(V_0) \quad (\text{B7})$$

Dessa ekvationer reducerar de fria anpassningsparametrarna från fem till fyra. Program JWL9 bestämmer de fyra fria parametrarna genom att minimera avvikelserna mellan isentropen och JWL anpassningen. Beräkningsalgoritmen beskrivs nedan.

### Beräkningsalgoritmen för JWL-anpassning till isentrop för oreagerat sprängämne

1) Generell JWL-form för en isentrop är, se ekvationer B3

$$P_s = Ae^{-R_1 V_s} + Be^{-R_2 V_s} + C / V_s^{(1+\omega)}$$

$$E_s = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V_s} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V_s} + \frac{C}{\omega V_s^\omega}$$

2) Randvillkor; JWL-anpassningen måste gå genom starttillståndet  $P_s = P_0$ ,  $V_s = V_0 = 1$  och  $E_0 = 0$

$$P_0 = Ae^{-R_1} + Be^{-R_2} + C \quad (B8)$$

$$0 = \frac{A}{R_1} e^{-R_1} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2} + \frac{C}{\omega} \quad (B9)$$

Ekvation B8 ger:  $C = P_0 - Ae^{-R_1} - Be^{-R_2} \quad (B10)$

Ekvationerna B9 och B10 ger:  $A = \frac{P_0 + Be^{-R_2}(\omega / R_2 - 1)}{1 - \omega / R_1} \cdot e^{R_1} \quad (B11)$

Ekvationerna B10 och B11 kan omskrivas till:

$$A = q_1 e^{R_1} - Bq_2 e^{(R_1 - R_2)} \quad (B12)$$

$$C = P_0 - q_1 + B(q_2 - 1)e^{-R_2} \quad (B13)$$

Här är:  $q_1 = \frac{P_0}{1 - \omega / R_1}$ ;  $q_2 = \frac{1 - \omega / R_2}{1 - \omega / R_1} \quad (B14)$

3) Beräkna trycket längs isentropen,  $P_s(V_s)$ , enligt JWL-tillstånd: sekvation B3, med hänsyn till randvillkoret, ekvationerna B12, B13 och B14.

$$P_s(V_s) = Ae^{-R_1 V_s} + Be^{-R_2 V_s} + C / V_s^{(1+\omega)}$$

$$= q_1 e^{R_1(1-V_s)} - Bq_2 e^{(R_1 - R_2 - R_1 V_s)} + Be^{-R_2 V_s} + (P_0 - q_1 + B(q_2 - 1)e^{-R_2}) / V_s^{(1+\omega)} \quad (B15)$$

$$= q_1 e^{R_1(1-V_s)} + B(e^{-R_2 V_s} - q_2 e^{(R_1 - R_2 - R_1 V_s)}) + (P_0 - q_1 + B(q_2 - 1)e^{-R_2}) / V_s^{(1+\omega)}$$

Omordna ekvation B15:

$$P_S(V_S) = q_1 e^{R_1(1-V_S)} + (P_0 - q_1) / V_S^{(1+\omega)} + B(e^{-R_2 V_S} - q_2 e^{(R_1 - R_2 - R_1 V_S)} + (q_2 - 1)e^{-R_2} / V_S^{(1+\omega)})$$

eller:

$$P_S(V_S) = s_1(V_S) + B \cdot s_2(V_S) \quad (B16)$$

$$\begin{aligned} \text{Här är: } s_1(V_S) &= q_1 e^{R_1(1-V_S)} + (P_0 - q_1) / V_S^{(1+\omega)} \\ s_2(V_S) &= e^{-R_2 V_S} - q_2 e^{(R_1 - R_2 - R_1 V_S)} + (q_2 - 1)e^{-R_2} / V_S^{(1+\omega)} \end{aligned} \quad (B17)$$

Observera att i ekvation B16 finns nu bara 4 fria parametrar kvar,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $B$  och  $\omega$ . De skall bestämmas nedan genom felminimering.

#### 4) Beräkna anpassningsfel

Anta att  $PT(V_{Si})$  är trycket enligt originaldata ( $i=1, 2, \dots, n$ ), då beräknas anpassningsfelet med följande felfunktion:

$$F(B, R_1, R_2, \omega) = \sum_{i=1}^n [PT(V_{Si}) - P_S(B, R_1, R_2, \omega, V_{Si})]^2$$

#### 5) Bestäm JWL parametrar

Minimera anpassningsfelet genom att  $\partial F / \partial B = 0$  ger lösningen för parameter  $B$ .

$$\text{För } \partial F / \partial B = 2 \sum_{i=1}^n (PT - P_S) \cdot (-1) \cdot \partial P_S / \partial B = 0$$

$$\text{ger: } \sum_{i=1}^n (P_S - PT) \cdot \partial P_S / \partial B = 0$$

$$\text{eller: } \sum_{i=1}^n P_S \cdot \partial P_S / \partial B = \sum_{i=1}^n PT \cdot \partial P_S / \partial B \quad (B18)$$

$$\text{Enligt ekvation B16: } \partial P_S / \partial B = s_2(V_S) \quad (B19)$$

Kombinera ekvationer B16 och B19 med B18:

$$\sum_{i=1}^n PT \cdot s_2(V_S) = \sum_{i=1}^n [s_1(V_S) + B \cdot s_2(V_S)] \cdot s_2(V_S)$$

$$\text{Lösa ut B: } B = \frac{\sum_{i=1}^n PT \cdot s_2(V_S) - \sum_{i=1}^n s_1(V_S) \cdot s_2(V_S)}{\sum_{i=1}^n s_2^2(V_S)} \quad (\text{B20})$$

Programmet JWL9 söker nu den punkt i en treparametersrymd ( $R_1$ ,  $R_2$  och  $\omega$ ) där anpassningsfelet är minst. När  $R_1$ ,  $R_2$  och  $\omega$  är väl bestämda, bestäms parametern B av ekvation B20 och parametrarna A och C av ekvationerna B10 och B11.

### Beräkningsalgoritmen för JWL-anpassning till isentrop av spränggasen

1) Tillämpa den generella JWL-formen, ekvation B2 på CJ punkten ( $E_{CJ}$ ,  $P_{CJ}$ ,  $V_{CJ}$ )

$$P_{CJ} = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_{CJ}}\right) \cdot e^{-R_1 V_{CJ}} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_{CJ}}\right) \cdot e^{-R_2 V_{CJ}} + \frac{\omega \cdot E_{CJ}}{V_{CJ}}$$

$$\text{eller: } A = q_1 e^{R_1 V_{CJ}} - B q_2 e^{(R_1 - R_2) V_{CJ}} \quad (\text{B21})$$

$$C = (P_{CJ} - A e^{-R_1 V_{CJ}} - B e^{-R_2 V_{CJ}}) V_{CJ}^{1+\omega} = (P_{CJ} - q_1 + B(q_2 - 1) e^{-R_2 V_{CJ}}) V_{CJ}^{1+\omega} \quad (\text{B22})$$

$$\text{Här är: } q_1 = \frac{P_{CJ} - \frac{\omega E_{CJ}}{V_{CJ}}}{1 - \frac{\omega}{R_1 V_{CJ}}}; \quad q_2 = \frac{1 - \frac{\omega}{R_2 V_{CJ}}}{1 - \frac{\omega}{R_1 V_{CJ}}}$$

2) Beräkna trycket längs en isentrop,  $P_S(V_S)$ , enligt JWL-tillståndsekvation B3a och med hänsen tagen till randvillkoret, ekvationerna B21 och B22

$$\begin{aligned} P_S(V_S) &= A e^{-R_1 V_S} + B e^{-R_2 V_S} + C V_S^{-(1+\omega)} \\ &= q_1 e^{R_1(V_{CJ} - V_S)} - B q_2 e^{(R_1 - R_2)V_{CJ} - R_1 V_S} + B e^{-R_2 V_S} + (P_{CJ} - q_1 + B(q_2 - 1) e^{-R_2 V_{CJ}}) (V_{CJ} / V_S)^{(1+\omega)} \\ &= q_1 e^{R_1(V_{CJ} - V_S)} + B(e^{-R_2 V_S} - q_2 e^{(R_1 - R_2)V_{CJ} - R_1 V_S}) + (P_{CJ} - q_1 + B(q_2 - 1) e^{-R_2 V_{CJ}}) (V_{CJ} / V_S)^{(1+\omega)} \end{aligned} \quad (\text{B23})$$

Omordna ekvation B23:

$$P_S(V_S) = q_1 e^{R_1(V_{CJ} - V_S)} + (P_{CJ} - q_1)(V_{CJ} / V_S)^{(1+\omega)} + B(e^{-R_2 V_S} - q_2 e^{(R_1 - R_2)V_{CJ} - R_1 V_S} + (q_2 - 1)e^{-R_2 V_{CJ}} \cdot (V_{CJ} / V_S)^{(1+\omega)} = s_1(V_S) + B \cdot s_2(V_S) \quad (B24)$$

Här är:

$$s_1(V_S) = q_1 e^{R_1(V_{CJ} - V_S)} + (P_{CJ} - q_1)(V_{CJ} / V_S)^{(1+\omega)}$$

$$s_2(V_S) = e^{-R_2 V_S} - q_2 e^{(R_1 - R_2)V_{CJ} - R_1 V_S} + (q_2 - 1)e^{-R_2 V_{CJ}} (V_{CJ} / V_S)^{(1+\omega)}$$

Observera att i ekvation B24 finns nu bara 4 fria parametrar kvar,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $B$  och  $\omega$ . De skall bestämmas nedan genom felminimering.

3) Jämföra de beräknade  $P_S(V_S)$ -värdena med originaldata t ex beräkningen från Cheetah,  $PT(V_S)$ , och beräkna anpassningsfelet med felfunktionen

$$F(B, R_1, R_2, \omega) = \sum_{i=1}^n [PT(V_{Si}) - P(B, R_1, R_2, \omega, V_{Si})]^2 \quad (B25)$$

4) Bestäm JWL-parametrar

Först bestäms parametrarna  $R_1$ ,  $R_2$  och  $\omega$ . Sedan bestäms parametern  $B$  genom att minimera anpassningsfelet,  $\partial F / \partial B = 0$ . Till sist bestäms parametrarna  $A$  och  $C$  ur ekvationerna B21 och B22. Beräkningsalgoritmen är precis det samma som i punkt 5 för JWL-anpassning till en isentrop för oreagerat sprängämne.

5) Beräkna expansionsenergin vid CJ-punkten,  $E_0$

$$E_0 = E_{CJ} - \frac{1}{2}(P_{CJ} - P_0)(V_0 - V_{CJ})$$

## Bilaga 6: Brinnmodell för sprängämne Emulsion 682

### 1) Principen för brinnmodellparameterbestämning

Arbetsgången eller flödesschemat för parameterbestämningen för en brinnmodell framgick av Figur 4 i Avsnitt 2.2.6. Hittills nu har materialdata för oreagerat sprängämne och spränggaser framtagits och värdena på VOD och krökningsradierna i detonerande PVC-rörladdningar erhållits. Vad som saknas är en brinnmodell som beskriver sprängämnets omvandling från fast oreagerat ämne till spränggaser. Här kommer programmet DYNA2D in i bilden.

Simuleringar görs med DYNA2D på detonationer i PVC-rörladdningar och VOD-värdena och krökningsradierna beräknas. Indata till beräkningarna är sprängämnets materialdata och en brinnmodell med antagna parametervärden. Värdena på brinnmodellparametrarna justeras tills beräknade VOD- och krökningsradie-värden överensstämmer med de mätta.

### 2) Beräkning med DYNA2D

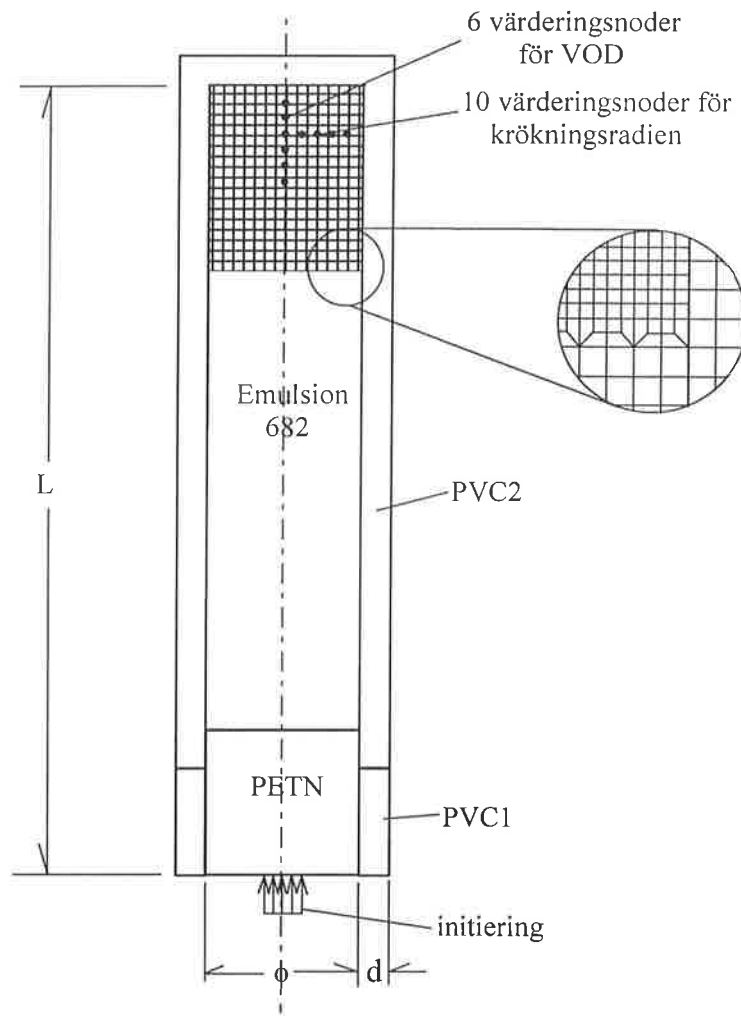
En typisk DYNA2D-simulering av detonation i PVC-rörladdningar kan se ut som i Figur B8. Tre material är inblandade i simuleringen, PETN primer, sprängämne Emulsion 682 och inneslutning i PVC-rör. För beräkningstekniskt skäl delas PVC i två delar, se PVC1 och PVC2 i Figur B8. Del PVC1 avläggs tillsammans med PETN från beräkningen när detonationen har passerat ungefär 80% av laddningslängden för att undvika vissa avbrott i beräkningen och hålla beräkningshastighet. SveBeFo:s beräkningskapaciteten t ex antal celler i en beräkning är mycket begränsad, därför koncentreras resursen till den mest intressanta delen av Emulsion 682 i slutändan av laddningen. Dvs där är cellerna mycket finare än i övrigt sprängämne.

Sex värderingsnoder för VOD längs laddningsaxeln och 10 värderingsnoder för krökningsradien längs en radie utplacerades nära slutändan av laddningen, se Figur B8. Detonationsfrontens ankomster vid de värderingsnoderna återger dels VOD värde och dels frontens form. En ellips anpassas till fronten och krökningsradien vid laddningsaxeln erhålls /B5/.

I parameterbestämningen för Emulsion 682 ingick 4 simuleringar med 4 olika laddningsdiametrar mellan 20 och 70 mm. Motsvarande laddningslängderna var alltid 4 gånger laddningsdiametern eller längre. Detonation i en så lång laddning har redan nått sitt stabila tillståndet långt före laddningens slutändan. Dessa och andra geometriska mått för simuleringarna sammanfattas i Tabell B5.

Figur B9 är en beräkning i en  $\phi$  40 mm laddning och motsvarande VOD och detonationsfronten visas i Figur B10.

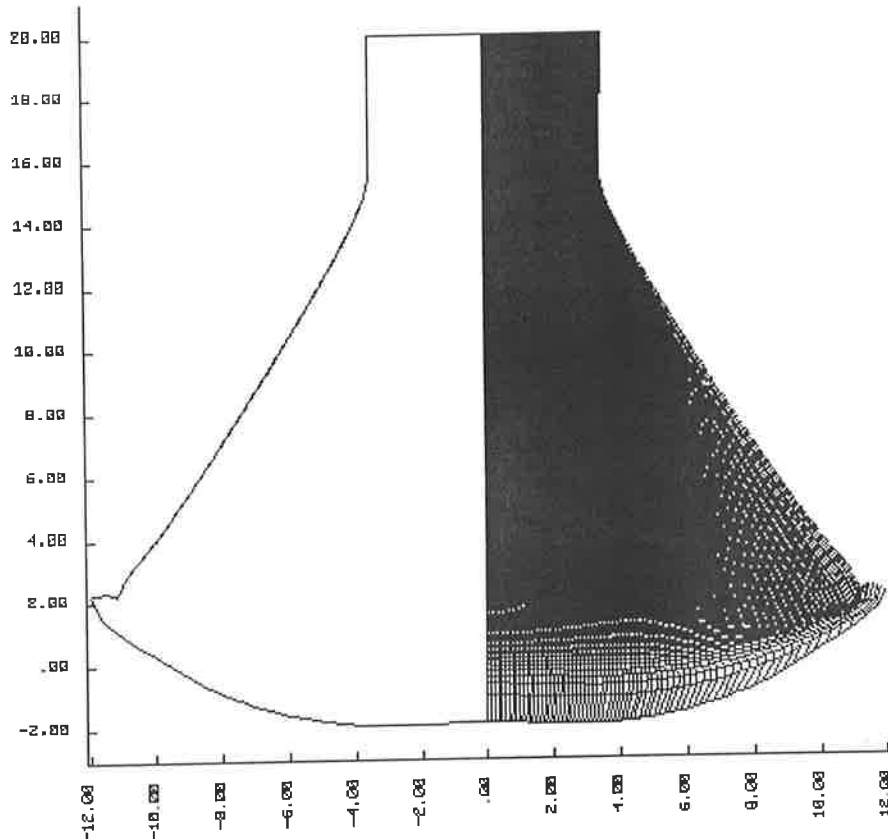




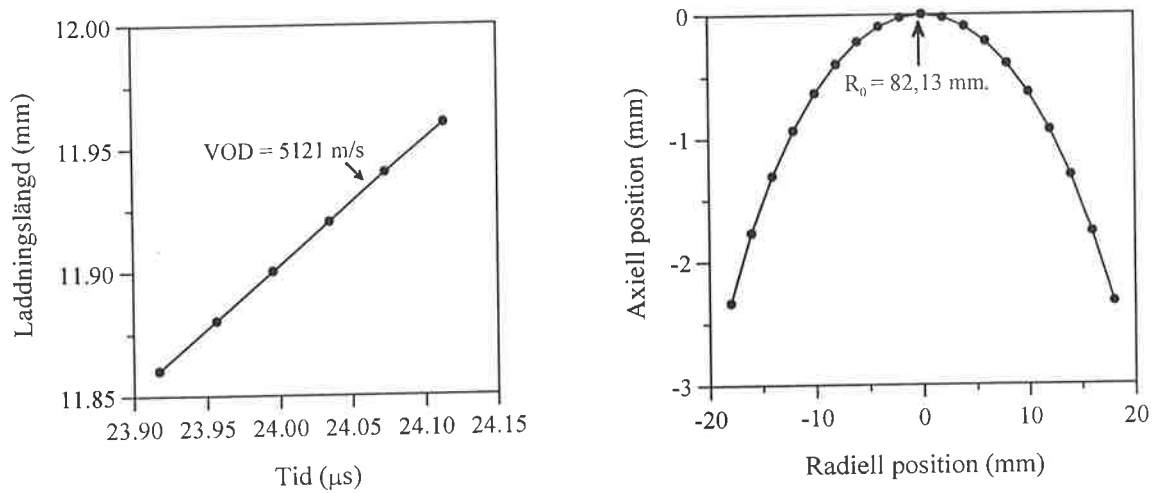
Figur B8: En typisk uppställning för DYNA2D-simulering av detonation i PVC-rörladdningar. Den mest intressanta delen av sprängämnet simuleras med finare celldelning.

Tabell B5: Geometrin för simuleringar som ingick i bestämningen av brinnmodellparametrar för Emulsion 682.

Beräknings Nr.	Laddnings-diameter, $\phi$ (mm)	Laddnings-längd, L (mm)	PVC-rör tjocklek, d (mm)	Finast celldelning i emulsionen (mmxmm)
1	20	80	1,9	0,1x0,1
2	40	160	2,3	0,2x0,2
3	60	240	3,1	0,2x0,2
4	70	320	3,6	0,4x0,4



Figur B9: Ett exempel på en DYNA2D-simulering. Laddningsdiametern är 40 mm. En del av PVC-röret, dvs PVC1 i Figur B8, och primern PETN har redan avlägsnats.



Figur B10: VOD och detonationsfronten ur simuleringen i Figur B9.

De ovannämnde simuleringarna är tvådimensionella. Det utförs också snabbare och enklare endimensionella simuleringar för att kunna lokalisera parametervärdenas ungefärliga position i parameterrymden.

### 3) Parameterbestämning och resultat

Den använda brinnmodellen heter "Ignition and Growth" /B8/ och har en form som i ekvation B26. Fysiska förklaringar till parametrarna finns bl a i /B5/

$$\frac{d\lambda}{dt} = ig(1 - \beta \cdot \lambda)^2 (\mu_e - \mu_c)^4 + gr(1 - \lambda)^{2/3} \lambda^{2/9} P^y \quad (\text{B26})$$

Här är:  $\lambda$  = reaktionsgrad = fraktion av sprängämne som har reagerat

$t$  = tid

$\mu_e$  = relativ kompression av sprängämnet =  $\rho_e / \rho_0 - 1$

$\mu_c$  = kritisk kompression av sprängämnet då reaktion startar, antas vara 0,05.

$\rho_e$  = densitet hos reagerande sprängämne

$\rho_0$  = startdensitet hos oreagerat sprängämne

$P$  = tryck

$ig, \beta, gr, y$  är de brinnmodellparametrar som skall bestämmas

Som beskrevs tidigare jämförs VOD- och krökningsradie-värden ur DYNA2D beräkningarna med de mätta värdena och avvikelserna mellan dem beräknas enligt ekvation B27. Värden på brinnmodellparametrarna bestäms genom minimering av avvikelserna eller Q-värdet enligt ekvation B27.

$$Q = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{VOD_{DYNA,i} - VOD_i}{VOD_i} \right)^2 + \left( \frac{R_{0DYNA,i} - R_{0i}}{R_{0i}} \right)^2 \right] \quad (\text{B27})$$

Här är:  $VOD_{DYNA,i}$  = VOD ur en DYNA2D-beräkning

$VOD_i$  = mätt VOD för samma laddningsdiameter som motsvarande DYNA2D-beräkningen

$R_{0DYNA,i}$  = krökningsradie på laddningsaxeln ur en DYNA2D-beräkning

$R_{0i}$  = mätt krökningsradie på laddningsaxeln för samma laddningsdiameter som motsvarande DYNA2D-beräkningen

$i$  = DYNA2D beräkningsnummer

$n$  = antal laddningsdiametrar som simuleras av DYNA2D för framtagning av brinnmodellparametrar.  $n = 4$  för Emulsion 682, se Tabell B5.

Metodiken att minimera avvikelserna är den samma som användes tidigare för K1 sprängämnen /B1/ men beskrivs kortfattat här. Först bestäms gränsvärden för parametrarna  $ig$  och  $gr$  genom endimensionella simuleringar. Sedan bestäms värdena för

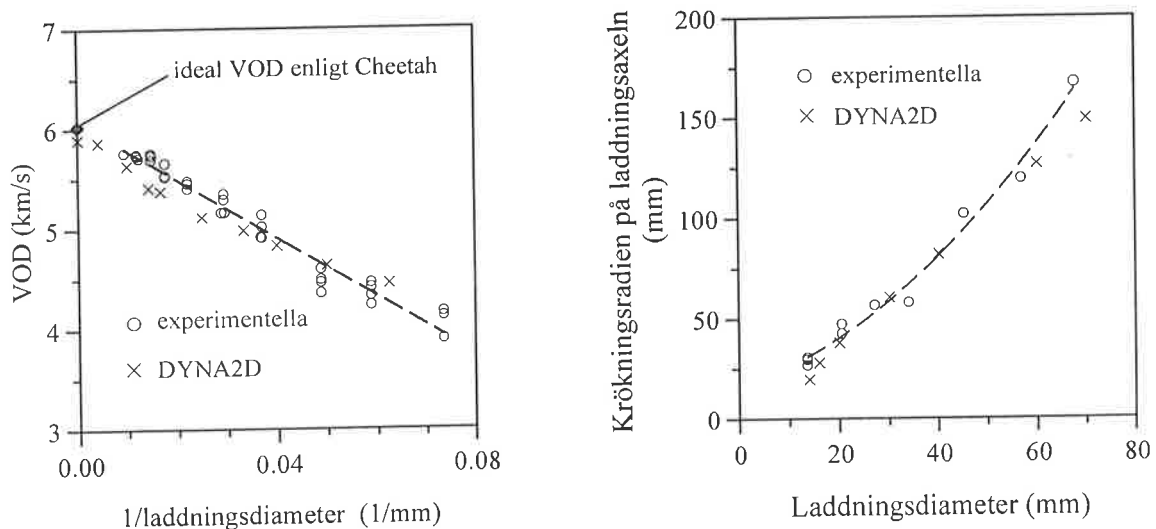
alla parametrarna genom de tvådimensionella simuleringar som beskrevs ovan. Slutresultatet är en brinnmodell för Emulsion 682 som i ekvation 7 eller B28.

$$\frac{d\lambda}{dt} = 110(1 - 1,5\lambda)^2(\mu_e - 0,05)^4 + 35(1 - \lambda)^{2/3}\lambda^{3/9}P^{1,84} \quad (\text{B28})$$

#### 4) Verifiering av brinnmodellen

Det framgår av tidigare beskrivningar att brinnmodellparametrarna bestämdes på basis av simuleringar och mätdata av 4 laddningsdiametrar, se Tabell B5. För att verifiera modellens duglighet utfördes ytterligare simuleringar och jämförelser med mätdata. Dels har modellen använts för simuleringar av detonationer i PVC-rörladdningar med olika laddningsdiametrar. Dels användes modellen för simulering av detonation i en laddning i stålrör, i vilket mätningen av VOD utfördes, se Tabell B1 b) i Bilaga 1.

Resultaten från simuleringarna med PVC-rörladdningar och dess jämförelser med mätdata visas i Figur B11. Det syns tydligt att överensstämmelsen är god. Den genomsnittliga avvikelser mellan simuleringar och mätdata är 3,4% för VOD och 10,3% för krökningsradier.



Figur B11: Jämförelse av beräknade VOD och krökningsradier med de mätta.

Simuleringen av detonationen i ett  $\phi$  68,6 mm och 3,6 mm tjockt stålrör resulterade i en VOD på 5813 m/s medan den mätta VOD är 5798 m/s. En avvikelse på mindre än 1%. Dessa jämförelser tyder på att brinnmodellen, ekvation 7, duger åtminstone till beskrivning av stabila detonationer i Emulsion 682.

## **Bilaga 7: Tryckkänslighet hos 470 $\Omega$ :s kolmotstånd - litteraturstudie av givarekalibrering**

### Bakgrund

Kolmotståndets tryckkänslighet sägs att ha upptäckts första gången vid en tillämpning för stora vattendjupa. Det är Watson /B9/ som konstruerade och kalibrerade den första tryckgivare som utnyttjar kolmotståndets tryckkänslighet. Sedan dess har denna typ av givare använts i många tryckmätningssammanhang för såväl dynamiska som statiska tryck. Många nya kalibreringar av kolmotståndet har också utförts.

Under utvecklingen av LHM-metoden /B10/ har kolmotståndet kalibrerats under statiska tryck upp till 2,1 GPa. Denna kalibrering bedömdes även vara giltig för dynamiska tryck inom det kalibrerade tryckområdet och användes i de tidigare sprängförsöken i granitblock /B2/. Däremot hade kalibreringens giltighet utanför det kalibrerade tryckområdet inte undersökts. Därför har en omfattande litteraturstudie genomförts med tyngdpunkten på tryckkänsligheten för 1/8 W kolmotstånd med 470  $\Omega$  i nominell resistens. Förutom de kalibreringsarbeten som kommer att nämnas nedan, finns också andra kalibreringar som vi inte kan dra direkt nytta av. Sådan litteratur har utelämnats.

### Kolmotståndets tryckkänslighet

Tabell B6 redovisar en sammanfattning av resultatet från litteraturstudien. Olika kalibreringar visas dessutom grafiskt i Figur B12, uppförstorade i olika tryckområden. Metoderna för dynamiska kalibreringar har varierat från en fallhammarvariant med långsamt stigande tryckpulser (stigtid ca 1 ms) till en lättgaskanon med väldefinierade tryckpulser (stigtid i ns-området). Tryckamplituden har också varierat stort, upp till 14 GPa.

Slutsatserna om tryckkänsligheten och kalibreringen av 470  $\Omega$ :s kolmotstånd sammanfattas nedan.

- 1) Det råder stora avvikelser såväl mellan olika kalibreringar som inom en och samma kalibrering. Detta kan bero på kolmotståndets heterogena natur. En utmärkt beskrivning av strukturen och tillverkningsprocessen för kolmotståndet finns i /B14/.
- 2) Den mest detaljerade studien av kolmotståndsgivare har utförts av Ginsberg och Asay /B16/. Förutom tryckkänsligheten har många andra faktorer inflytande studerats.
- 3) De mest omfattande dynamiska kalibreringarna har gjorts av Hollenberg /B13/ och Ginsberg och Asay /B16/. Deras resultat överensstämmer rätt väl med varandra i tryckområdet över 0,7 GPa. I tryckområdet under 0,7 GPa skiljer sig Ginsberg och Asays kalibreringar från andras. En orsak är att Ginsberg och Asay hade få kalibreringspunkter i det tryckområdet och det lägsta kalibrerade trycket var ca 0,4 GPa.

Tabell B6: Tryckkänsligheten hos kolmotstånd med 470  $\Omega$  nominell resistans.

Forskare	Motstånds specifikationer	Kalibrering	Resultat
Watson 1967 /B9/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Nominell noggrannhet: 5% Effekt: 1/10 W Dimension: $\phi 1,7 \times 5,0$ mm Mätt motstånd: $452 \pm 0,5 \Omega$	Dynamisk. Barriärprov. <sup>ⓐ</sup> ca 1-7 GPa.	1) Erfarenheter tyder på att kalibreringskurvan kan extrapoleras till tryck under 0,1 GPa.
Scholz 1981 /B11/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Effekt: 1/8 W	Dynamisk. Fallhammare. Tryckets stig- tid ca 1 ms. 0-0,25 GPa.	1) $P = -0,529 \Delta R/R_0$ <sup>ⓑ</sup> 2) Den dynamiska kalibreringen överensstämmer mycket väl med andras statistiska kalibreringar i testområdet
Jerberyd 1982 /B12/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Nominell noggrannhet: 5% Effekt: 1/8 W	Dynamisk. Fallhammare. 0-0,05 GPa.	1) Linjärt förhållande mellan tryck och motståndsminskning 2) Det dynamiska kalibreringen stämmer mycket väl med tidigare statisk kalibrering i testområdet
Hollenberg 1983 /B13/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Effekt: 1/8 W Dimension: $\phi 1,6 \times 4$ mm Mätt motstånd: 470 $\Omega$	Dynamisk. Barriärprov. <sup>ⓐ</sup> 0-13 GPa.	1) $P = -0,3606 + 0,3692 \left(\frac{R_0}{R}\right) - 0,0101 \left(\frac{R_0}{R}\right)^2$ $1 \leq R_0/R < 4,2$ 2) $P = \sum_{i=0}^7 a_i \left(\frac{R_0}{R}\right)^i$ $4,2 \leq R_0/R < 29$ <sup>ⓑ</sup> 3) $P = 6,386 + 0,1571 \left(\frac{R_0}{R}\right)$ $29 \leq R_0/R < 50$ <sup>ⓑ</sup>
Wilson Holloway Bjarnholt 1987 /B14/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Effekt: 1/8 W	Dynamisk. mot en PCB givare. "Shock tube" <sup>ⓐ</sup> 0~0,16 GPa.	$P = -0,873 \Delta R/R_0$
Wieland 1988 /B15/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Mätt motstånd: 475 $\Omega$	(Dynamisk ?) 0~2,5 GPa	$P = 0,5 \Delta G/G_0$ <sup>ⓑ</sup>
Ginsberg Asay 1991 /B16/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Effekt: 1/8 W Dimension: $\phi 1,7 \times 3,9$ mm	Dynamisk. Lättgaskanon och akvarieprov. 0~14 GPa.	1) $P = 7,071 - 4,345(R/R_0) + 0,364(R_0/R) - 8,40 \exp(-R/R_0)$ 2) uppskattad stigtid i motståndet: ca 200 ns
Persson 1997 /B10/	Nominellt motstånd: 470 $\Omega$ Nominell noggrannhet: 5% Effekt: 1/8 W Dimension: $\phi 1,6 \times 3,9$ mm	Statisk. 0~1 GPa. 1~2,1 GPa.	$P = 0,4075 (\Delta G/G_0)^{0,8734}$ $P = 0,2597 (\Delta G/G_0)^{1,3128}$

---

 Förklaring till Tabell B6.

①: Kalibreringstrycket varieras med tjockleken på barriären och beräknas m h a impedanspassning

②:  $R =$  motstånd ( $\Omega$ )  $G =$  konduktans  $= 1/R$  ( $1/\Omega$ )

$R_0 =$  motståndet vid 1 atm ( $\Omega$ )  $G_0 = 1/R_0$  ( $1/\Omega$ )

$\Delta R = R - R_0$  ( $\Omega$ )  $< 0$   $\Delta G = G - G_0$  ( $1/\Omega$ )

$P =$  tryck (GPa)  $\Delta G/G_0 = -\Delta R/R$

③: Koefficienterna i uttrycket 2):  $a_0 = -2,542$ ;  $a_1 = 1,694$ ;  $a_2 = -0,3016$ ;  $a_3 = 2,871 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_4 = -1,323 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_5 = 3,151 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_6 = -3,755 \cdot 10^{-7}$  och  $a_7 = 1,774 \cdot 10^{-9}$

Uttrycket 3) i området  $29 \leq R_0/R < 50$  ger stora avvikelser från mätdata, däremot passar uttryck 2) mätdata bättre även där. Därför används i Figur B12 uttrycket 2) även för området  $29 \leq R_0/R < 50$ .

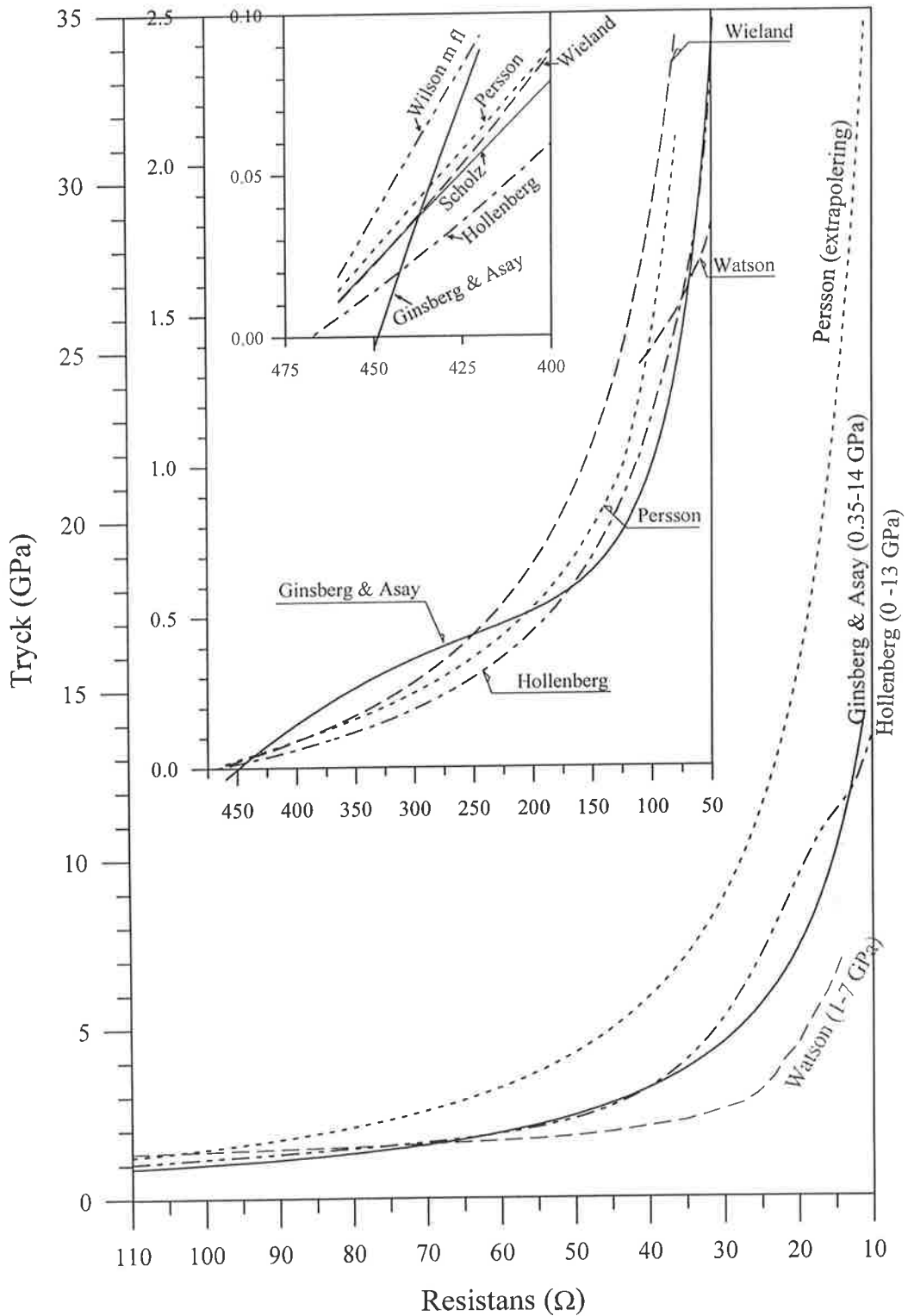
④: "Shock tube": sprängämne detoneras i ena ändan av röret och trycket mäts i motstående ända.

---

- 4) Perssons statistiska kalibrering /B10/ i lågtrycksområdet under ca 0,5 GPa faller in som en ungefärlig medellinje för de andra kalibreringarna.
- 5) Jämförelsen mellan flera statiska och dynamiska kalibreringar /B11/ visar att statiska kalibreringar överensstämmer väl med dynamiska kalibreringar i tryckområdet upp till 1 GPa.
- 6) Utifrån ovannämnda punkter, punkt 2 till 5, bedöms att det lämpligast kalibreringsresultatet för kolmotståndet i LHM-givaren är Ginsberg och Asays för tryck över 0,5 GPa och Perssons för tryck under 0,5 GPa. Detta är bakgrunden till ekvationerna 8a och 8b i Avsnitt 3.1.
- 7) Kolmotståndet blir mindre tryckkänsligt ju högre trycket är. Med tanke på detta faktum rekommenderade Hollonberg /B17/ ett användningsområde på 0-10 GPa för 470  $\Omega$ :s kolmotstånd. Ginsberg och Asay var mer konservativa och rekommenderade ett användningsområde på 0-5 GPa /B16/.

Andra viktiga fakta om kolmotståndsgivare sammanfattas nedan.

- 1) Den kortaste stigtiden ett motstånd kan prestera uppskattades till ca 200 ns av Ginsberg och Asay /B16/ men mättes till 125 ns i Hollenbergs försök /B17/ där motståndet inbäddades i PMMA och var i kontakt med en detonerande PETN-laddning.
- 2) Det är välkänt att kolmotståndet uppvisar hysteres vid en avlastning /B10, B16/. Dessvärre är det svårare att behandla hysteresen matematiskt. Hysteresen beror inte bara på kolmotståndets egenskaper utan också på avlastningens karaktär t ex hur snabbt och hur mycket trycket faller och hur lång tryckpulsen har varit. Det skall nämnas att alla piezoresistiva tryckgivare har hysteres. Det tar helt enkelt tid för givarna att återfå sin ursprungsvolym när trycket avtar eller försvinner.
- 3) Enligt Ginsberg och Asays studie /B16/ kan kolmotståndsgivaren användas i många mätsituationer. Det kan mäta såväl endimensionellt tryck som divergerande tryck. Det kan mäta tryck i såväl homogena som heterogena medier och i såväl inerta som reaktiva medier.



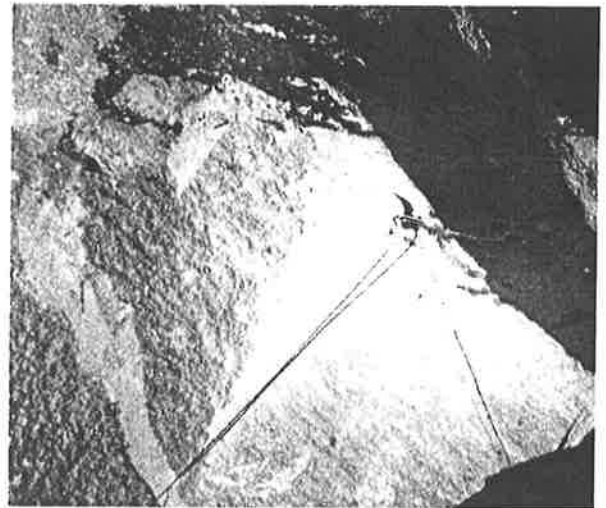
Figur B12: Kalibreringar av tryckkänsligheten hos 470 Ω:s kolmotstånd enligt Watson /B9/, Scholz /B11/, Hollenberg /B13/, Wilson, Holloway och Bjarnholt /B14/, Wieland /B15/, Ginsberg och Asay /B16/ och Persson /B10/. Observera att kalibreringarna visas i olika uppförstorade tryckområde.



**Bilaga 8: Utseende hos granitblocken och tryckgivarna före och efter sprängförsöken**



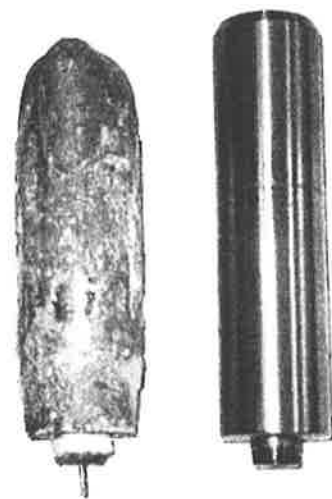
a)



b)



c)



d)

Figur B13: Bilder från Försök 1 i granitblock med fulladdat hål.

a): Blocket före sprängförsöket fotograferat framifrån.

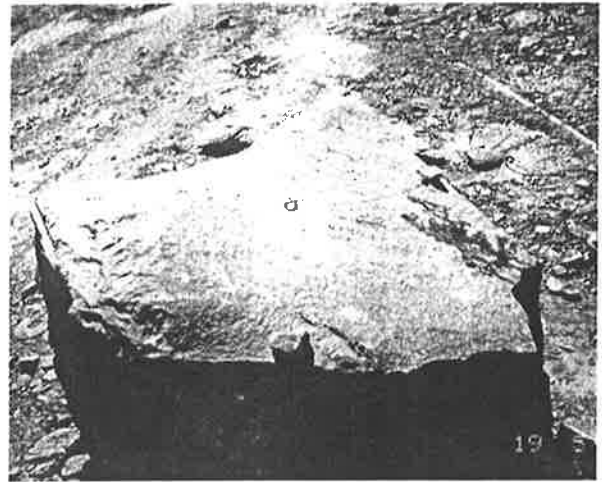
b): Blocket före sprängförsöket fotograferat uppifrån.

c): Blocket efter sprängförsöket.

d): LHM-givaren efter sprängförsöket jämförd med en nyttillverkad.



a)



b)



c)



d)

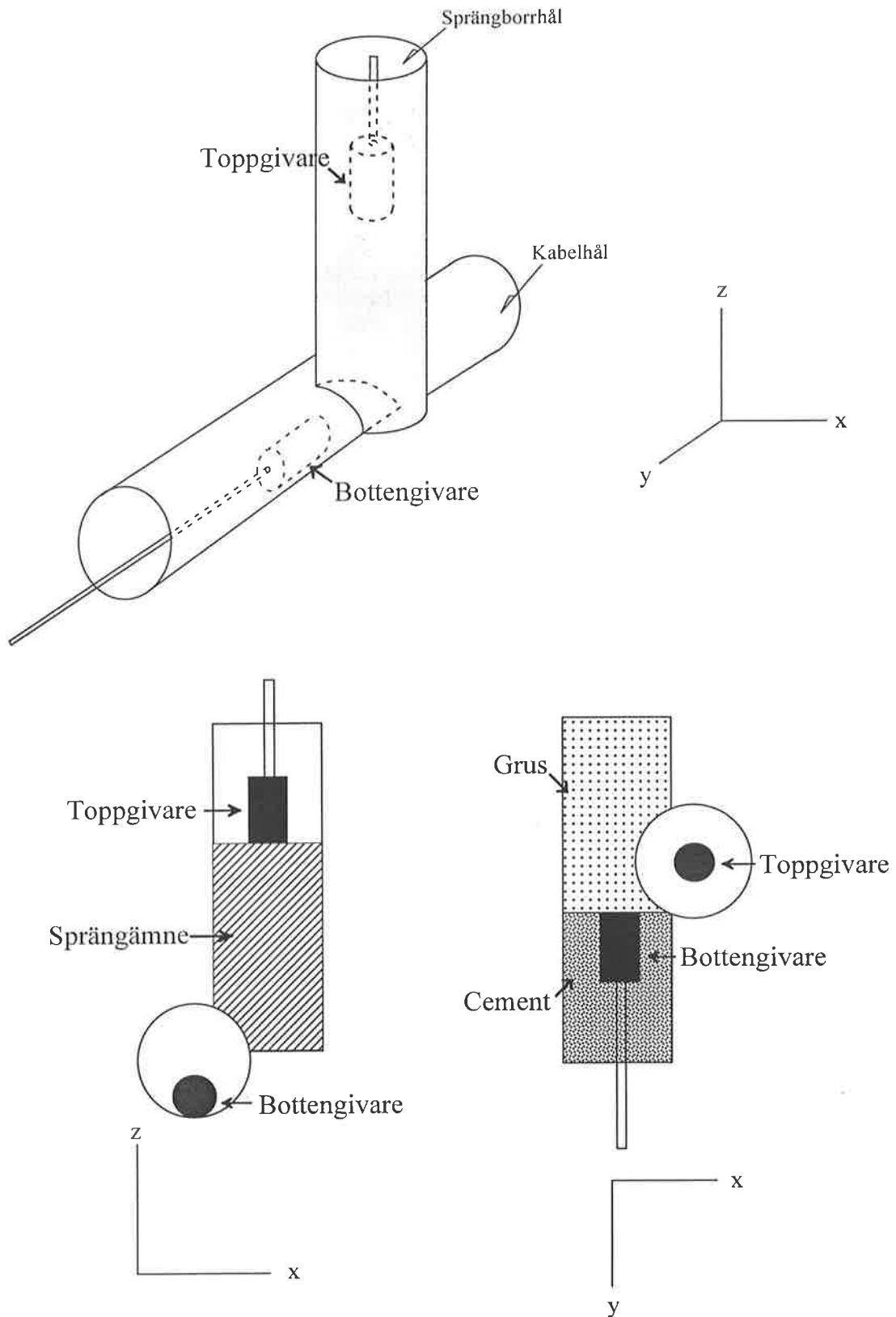
Figur B14: Bilder från Försök 2 i granitblock med frikopplad laddning, 21,2 mm laddning i 37 mm hål.

a): Blocket före sprängförsöket fotograferat framifrån.

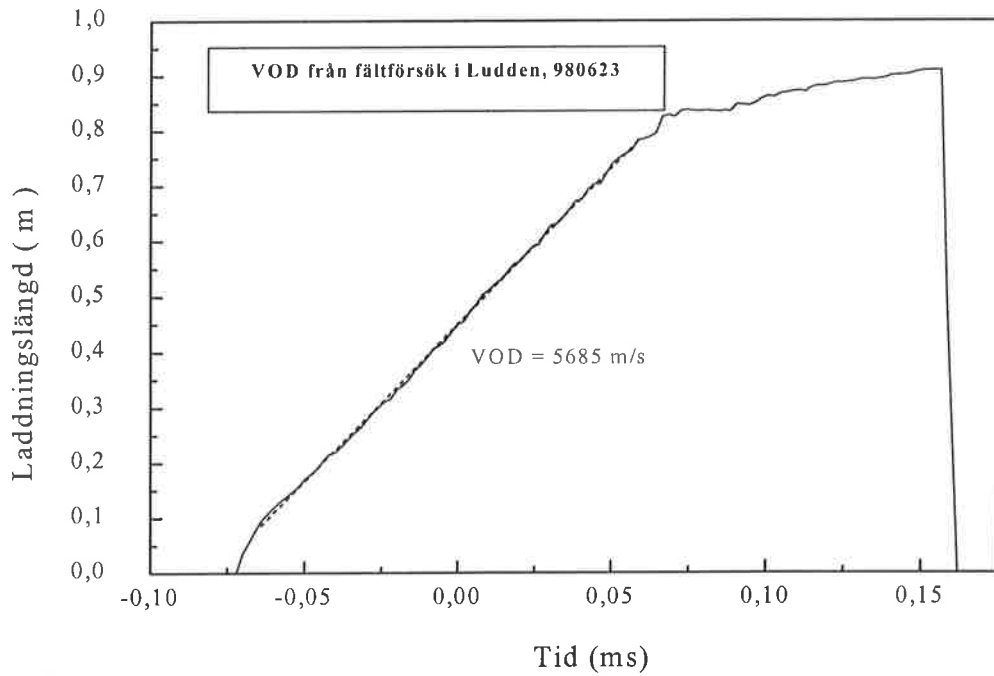
b): Blocket före sprängförsöket fotograferat uppifrån.

c): Blocket efter sprängförsöket

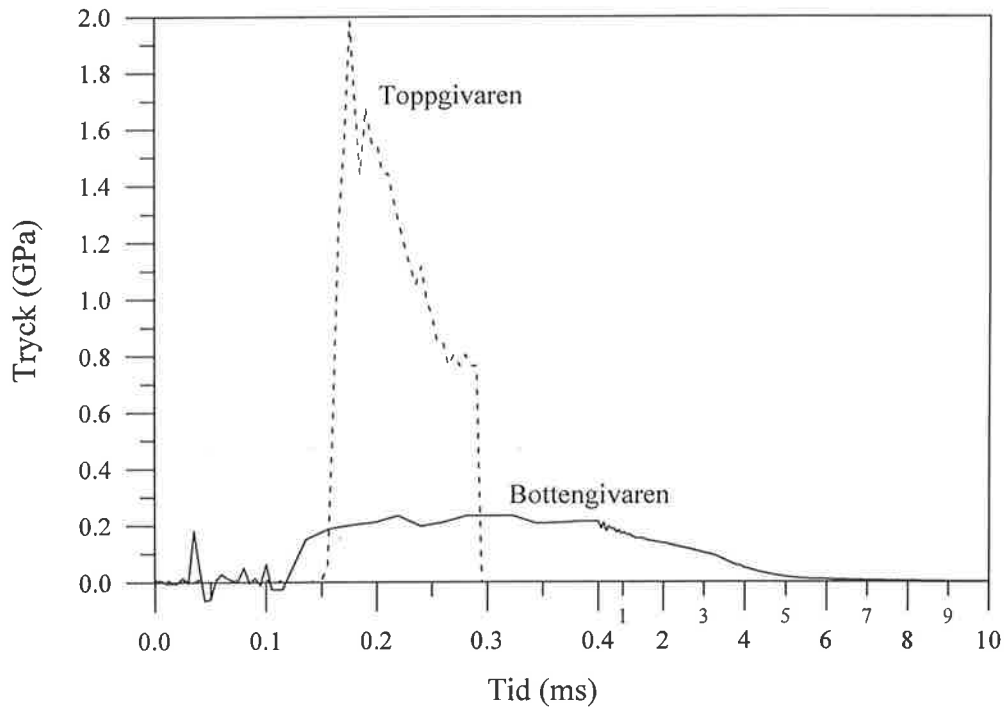
d): LHM-givaren efter sprängförsöket jämfört med utseende före försöket.



Figur B16: Uppställningen av ett fältförsök med tryckmätning i borrhål vid pallsprängning i Luddens stenbrott.



Figur B17: VOD i Hexotol mätt i  $\phi$  76 mm hål i Ludden stenbrott.



Figur B18: Trycksignaler från fältförsöket i Luddens stenbrott. Observera att den första delen av tidsaxeln har uppförstorats kraftigt.

### Analys av trycksignalen från toppgivaren

Toppgivaren låg mellan sprängämnet och den lösa förladdningen, se Figur B16. Det har registrerat ett topptryck på ca 2 GPa och en varaktighet på ca 0,15 ms. Den snabba tryckminskning tyder på att givaren rörde sig hastigt mot förladdningen. Den hastiga givarerörelsen orsakade ett kabelbrott som avslutade signalen och avgjorde signalens varaktighet.

Om de empiriska formlerna, ekvationerna 9 till 12, används för en uppskattning av borrhålstrycket, erhålls ca 5,1 GPa. Kvoten mellan uppmätt topptryck och uppskattat borrhålstryck blir då 0,4:1, vilket stämmer bra med värdena från försöken i granitblocken, se Tabell 4 i Avsnitt 3.2.2.

Jämfört med signalerna från granitblocken, se Figur 7, syns inte de stegvis tryckstigningarna i Figur 7 lika tydligt i Figur B18. Det kan beror den lösa förladdningsmaterialet ovanför toppgivaren. Inga starka reflektioner har kommit därifrån.

### Analys av trycksignalen från bottengivaren

Bottengivaren hade inte direkt kontakt med sprängämnet och dessutom hade den lösgrus framför sig, se Figur B16. Därför har givaren registrerat en lång trycksignal men med låg amplitud. Emellertid är det intressant att notera att trycket låg kvar i berget i ca 6 ms innan det har fallit helt till atmosfärtryck.

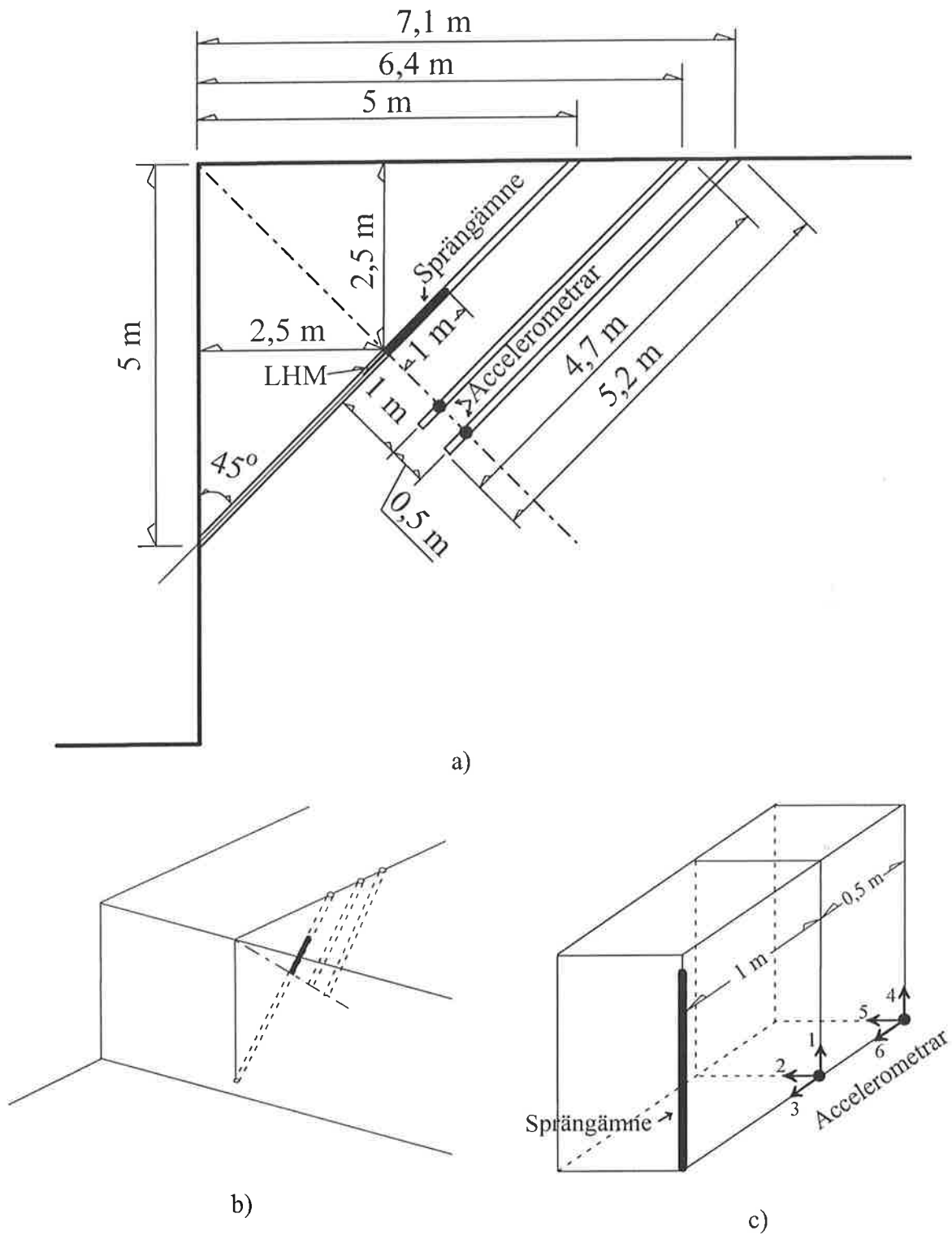
### Slutsaten från fältförsök i Ludden stenbrott

Det är för krävande att borra ett kabelhål som måste möta sprängborrhålet axiellt och dessutom stanna vid sprängborrhålet. En så hög precision i borring kan förmodligen inte nås med vanliga borrhållsborrningar i stenbrott. Denna slutsats har lett till nya modifieringar av försöksupställningen.

### 3) Försök i Storugns kalkstensbrott

En kompromisslösning som tar hänsyn till både pallsprängning och konventionella borrhållsborrningar i stenbrott dök upp efter försöket i Ludden. Lösningen illustreras i Figur B19. Sprängborrhålet borras snett så att det mynnar ut i pallfronten. På så sätt kan den nedre delen av hålet användas som kabelhål. Givaren placeras i mitten av hålet så att reflektioner från fria ytor når den så sent som möjligt.

För mätning av vibrationer i berget borras två parallella hål bakom sprängborrhålet. Tekniken att fästa accelerometrar i hålbotten har utvecklats tidigare /B18/ och har redan använts i många mätuppdrag.



Figur B19: Försöksupställning baserad på ett snett borrarat sprängborrhål.  
 a): 2D skiss med detaljer; b): 3D skiss och c) 3D skiss av placering av  
 accelerometrar relaterat till sprängborrhålet.

Det första försöket med denna försöksuppställning har utförts i Storugns kalkstensbrott på Gotland. Figur B19 visar detaljmått i försöksuppställningen och håldiametern var 89 mm. Avstånden mellan sprängborrhålet och accelerometrarna var mycket korta med tanke på håldiametern. Meningen med detta var att försöket skulle kunna simuleras efteråt med programmet DYNA2D med begränsat antal celler. Risken är att accelerometerhålen skadas av sprängningen och accelerometrarna kan inte återvinnas.

I försöket hade två tryckgivare gjutits in i hålet med cement. Efter härdningen laddades ca 8 kg sprängämne Emulsion 682 ovanpå givarna och sonden för kontinuerlig VOD-mätning trycktes in i sprängämnet. Resten av hålet förladdades med smågrus. Initieringen skedde i hålbotten med en st MaxiPrime av 50 g pressad TNT och PETN.

Tre accelerometrar, en i varje riktning, monterades i botten av varje accelerometerhål, se Figur B19 c). Registreringsutrustning var följande. För VOD-mätningen har instrumentet MiniTrap tillverkat av MREL i Kanada använts. Mätsonden är en så kallad VOD Probe, dvs en 0,9 m lång smal men styv motståndspinne med ett jämnfördelat motstånd på 322,5  $\Omega$ /m. För registrering av signalerna från tryckgivarna användes ett LeCroy 9354a digital oscilloskop och en jonisationspuls från primern användes som triggpuls. Signalerna från accelerometrarna registrerades av en Sony SIR-1000 digital bandspelare.

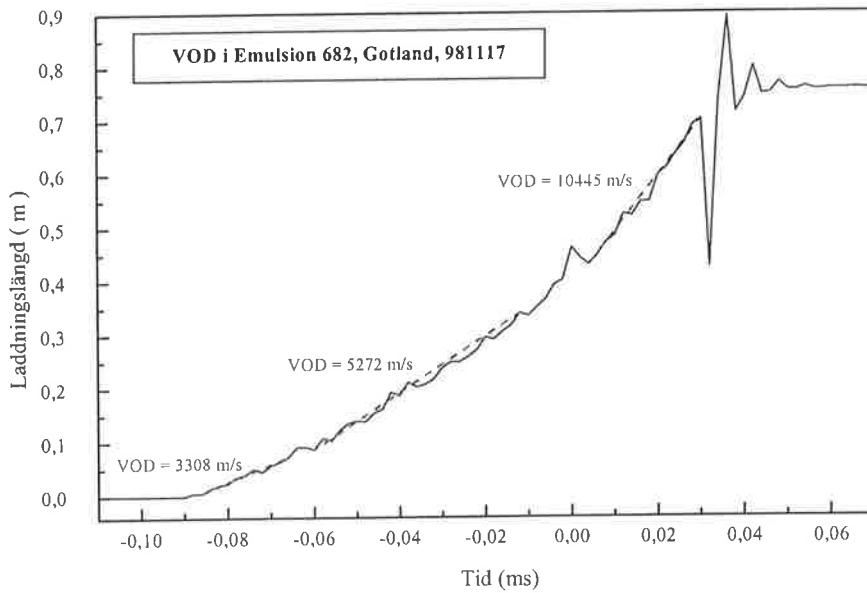
Innan själva fältförsöket har många laboratorieförsök och småskaliga försök utförts i syfte att utveckla och utpröva tekniken för ingjutning av givarna och laddning av sprängämnet i hålet. Vid ingjutningen av givarna får Till exempel inte cementen stiga över och täcka givarna. Cementnivån måste stanna precis jämt med givarändan så att givarna tillåts stå i direkt kontakt med sprängämnet.

En annan svårighet är laddningen av sprängämnet. I och med hålet lutar ca 45° kan inte sprängämnet rinna ner av egen vikt. Någon mindre pump eller laddutrustning var inte heller tillgänglig. Därför har en stor "spruta" tillverkats och sprängämnet sprutas ner i hålet. Hanteringen av sprutan är krånglig. Trots detta har tekniken fungerat bra.

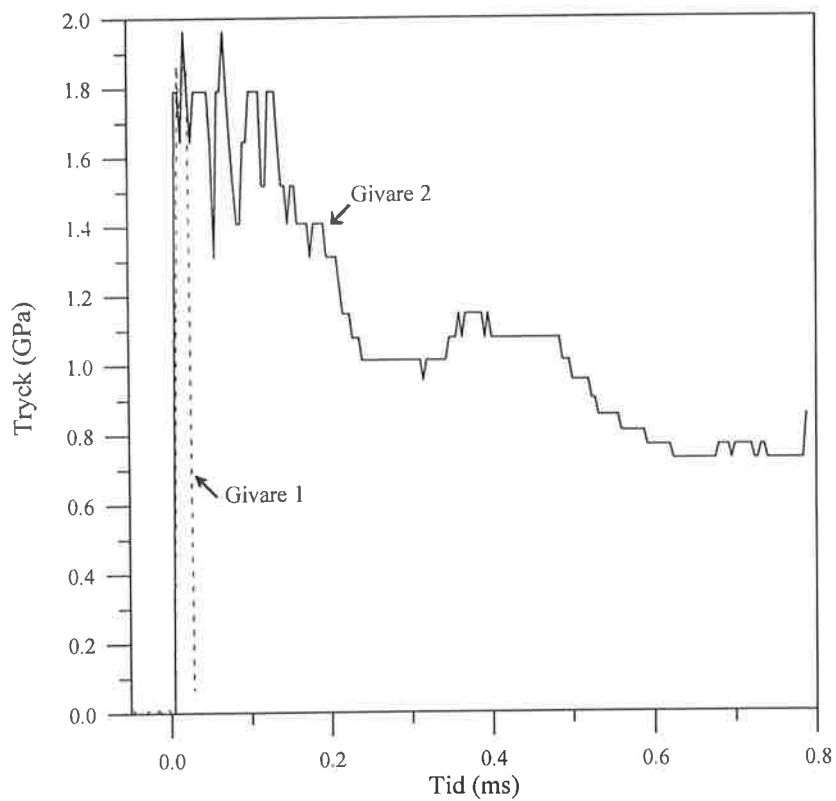
Mätresultat, VOD i sprängämnet, tryck i sprängborrhålet och acceleration i berget redovisas nedan, Figureerna B20 till 23.

### VOD mätningen

Resultatet i Figur B20 visar att detonationen i hålet ständigt accelererade, från ca 3300 m/s i botten till ca 10000 m/s i laddningsslutet. En närmare granskning visade att detta är inte den sanna VOD i hålet. VOD analysprogrammet visade ett felmeddelande vid analysen. Möjliga orsaker till felet är elektriska läckage i skarvar eller i skadade mätkablar. Därför blev det mätta VOD värdet felaktigt och det sanna VOD värdet kunde inte uppskattas på andra sätt heller.



Figur B20: VOD hos Emulsion 682 i  $\phi$  89 mm hål i en kalkstenspall på Gotland.



Figur B21: Borrhålstrycket mätt av två LHM-givare i  $\phi$  89 mm hål i en kalkstenspall på Gotland laddat med Emulsion 682.



### Borrhålstrycket

Två trycksignaler registrerades, se Figur B21. Men signalen från Givare 1 var mycket kortvarig. Tydligt har det inträffat ett kabelbrott kort efter tryckets ankomst. Givare 2 registrerade en tryckvaraktighet på ca 0,8 ms innan en kortslutning inträffade i kabeln. Båda tryckgivarna registrerade ett topptryck på ca 1,9 GPa. Det bör påminnas att samplingsfrekvensen på oscilloskopet var lågt inställd, 4  $\mu$ s/sampel. Tanken var att oscilloskopet skulle kunna registrera en mycket lång trycksignal på t ex 200 ms. Därför kan man inte lita helt och hållet på topparna i signalerna.

I och med VOD-värdet var felaktigt kunde inte värdet på borrhålstrycket uppskattas empiriskt. Ändå är topptrycket jämförbart med de från försöket i Luddens granitstenbrott.

### Vibrationerna i berget

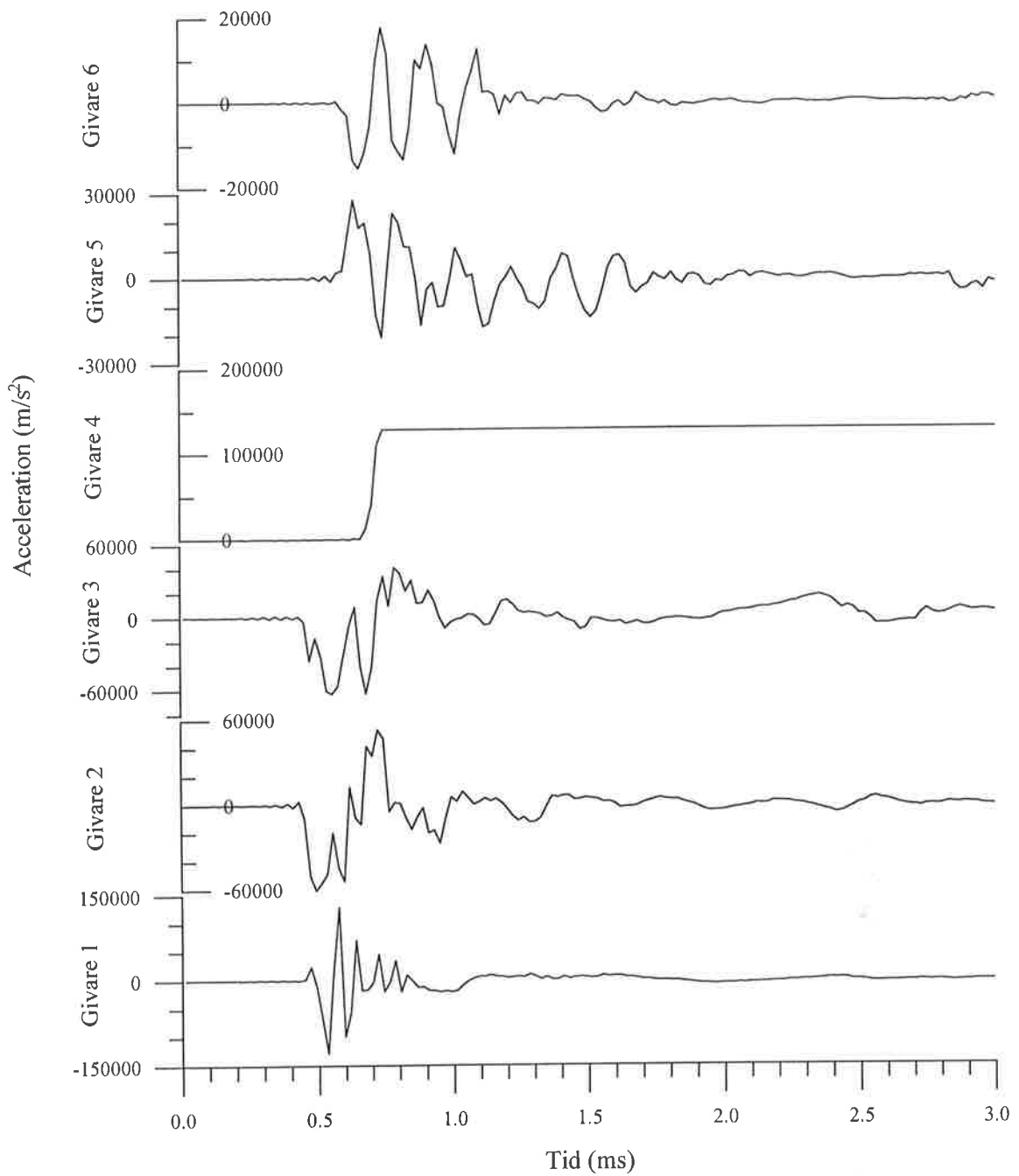
Accelerometrarnas placeringar och riktningar visades i Figur B19 c). Sammanfattningsvis beskrivs accelerometrarnas riktningar nedan:

<u>Givare Nr.</u>	<u>Riktning</u>
1 och 4	parallell med sprängladdningen och riktad uppåt mot pallens ovanyta
2 och 5	vinkelrätt mot sprängladdningen men parallellt med pallkrönet
3 och 6	vinkelrätt mot sprängladdningen och riktad uppåt mot pallkrönet

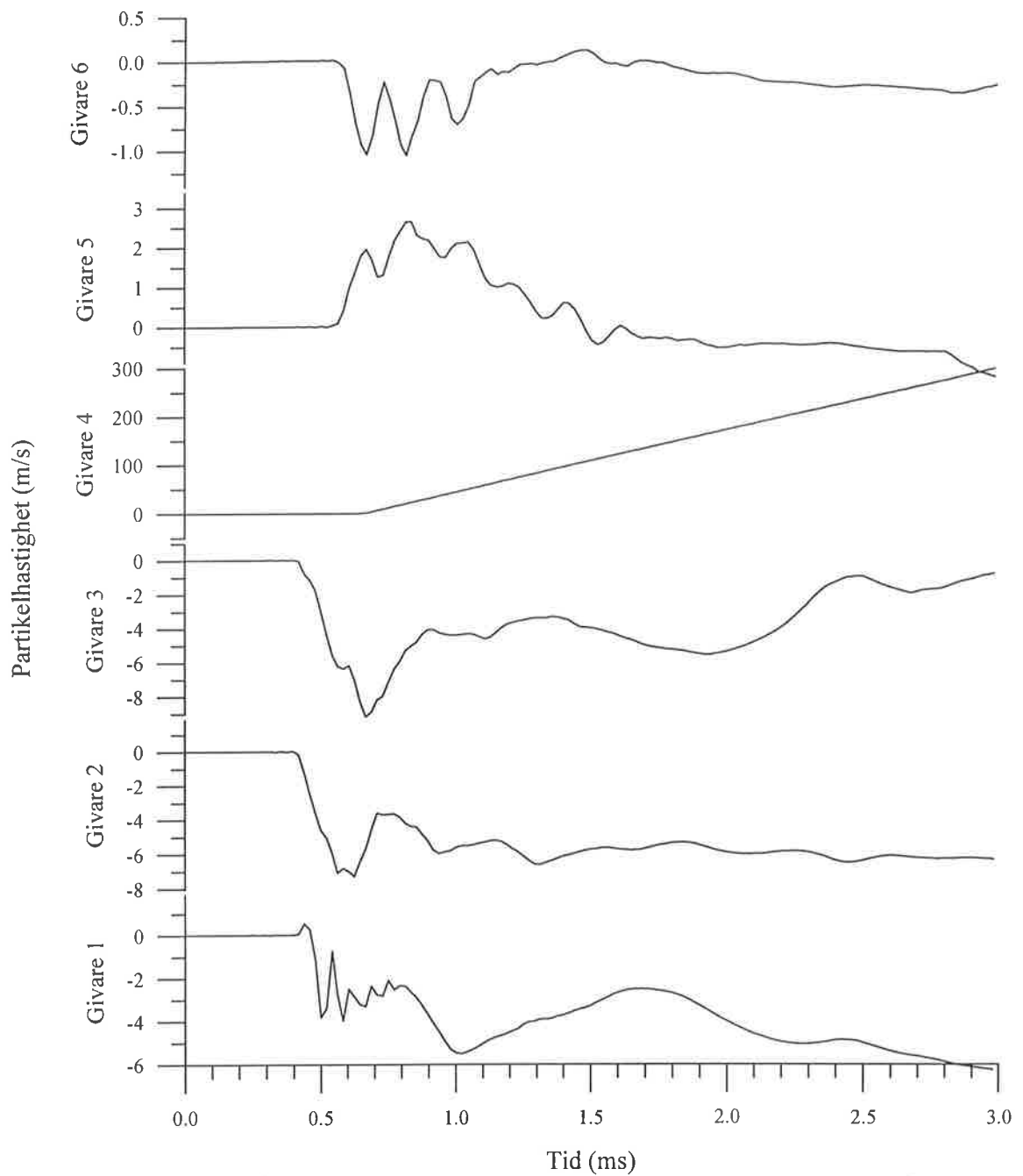
Generella slutsatser från vibrationsmätningarna är att nivåerna var mycket höga men de minskade med ökande avstånd till sprängladdningen. Något fel har drabbat Givare 4 eller kabeln till Givare 4 och registreringen därifrån var något annat än vibrationen.

### Slutsaten från fältförsök i kalkstenspallen på Gotland

Metodiken kring ett snett borrarat hål fungerar trots invecklade procedurer. Samplingsfrekvensen för tryckregistreringen bör vara högre. Dessutom är det svårt att registrera tryckvaraktigheten längre än ett par ms på grund av kortslutningar eller avbrott i kablarna.



Figur B22: Mätningar av acceleration i berget i fältförsök i kalkstenspall på Gotland.



Figur B23: Partikelhastighet i berget i fältförsök i kalkstenspall på Gotland, beräknat ur mätningarna av accelerationer i berget, se Figur B22.

**Bilaga 10: Pallen i kalkstensbrottet före och efter sprängförsöket**



a)



b)



c)



d)

Figur B24: Bilder från försök i kalkstenspallen i Storugns på Gotland.

- a): Pallen före sprängning, vyn från pallfronten.
- b): Pallen efter sprängning, vyn från pallfronten.
- c): Pallen före sprängning, vyn på ovanytan.
- d): Pallen efter sprängning, vyn på ovanytan.

### Referenser i bilagor

- B1. Deng J, Nie S, Nyberg U och Ouchterlony F: "A Burning Model for Five Emulsion Explosives and Some Applications". SveBeFo Rapport 43. 1999.
- B2. Nie S: "Borehole Pressure in Blast Holes - Measurements in Granite Blocks versus Estimations". SveBeFo Report 42. 1999.
- B3. Nyberg U, Deng J och Chen L, "Mätning av detonationshastighet och krökningsfront i samband med brinnmodellutveckling för emulsionssprängämne K1". SveBeFo Rapport 6. 1995.
- B4. Nyberg U och Deng J: "Bestämning av Hugoniotparametrar för ett Emulsionssprängämnes matris". SveBeFo Rapport 11. 1994.
- B5. Deng J, Nie S och Chen L: "Determination of Burning Rate Parameters for an Emulsion Explosive". SveBeFo Report 17. 1995.
- B6. Fried L E: "Cheetah 1.39 User's Manual". Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-MA-117541 Rev. 3. Mars 19, 1996.
- B7. Almström H: Privat kommunikation. FOA Grindsjön. 1995.
- B8. Murphy M J, Lee E L Weston A M och Williams A E: "Modelling Shock Initiation in Composition B". Lawrence Livermore National Laboratory, Report No. UCRL-JC-111975, 1993.
- B9. Watson R: "Gauge for Determining Shock Pressure". The Review of Scientific Instruments, Vol. 38, No. 7, sid. 978. Jul., 1967.
- B10. Persson G: "LHM, en metod för mätning av hela trycktidförloppet i sprängborrhål". SveBeFo Rapport 34. 1999.
- B11. Scholz F: "Über die Druckbeeinflussung von Sprengladungen durch die Schwaden früher detonierender Nachbarladungen beim Sprengen mit Millisekundenzündern im Karbongestein". Berichte der Versuchsgrubengesellschaft mbH, Heft 16. Versuchsgrubengesellschaft mbH, Dortmund, Tyskland. 1981.
- B12. Jerberyd L: "Calibration of a Gauge for Determining Shock Pressures". Research and Development (Detonic Laboratory), Nitro Nobel. Technical Report DL 1982:22. 1982.
- B13. Hollenberg K: "Druckmessungen an Stoßwellen in Flüssigkeiten und Festkörpern". Der Mathematisch - Naturwissenschaftlichen, Fakultät der Universität Düsseldorf als Habilitationsschrift vorgelegt. Düsseldorf, Tyskland. Jun. 1983.

- B14. Wilson W H, Holloway D C och G Bjarnholt: "Measurement of Pressure Loadings from Explosively Loaded Boreholes used Expendable Piezoresistive Transducers". Proceedings of the 1987 American Society of Mechanical Engineers Meeting, Cincinnati, Ohio, USA. Jun. 14-17, 1987.
- B15. Wieland M S: "Cross Borehole Stress Wave Measurements in Underground Coal". Proceedings of the 4th Mini-Symposium on Explosives and Blasting Research, Society of Explosives Engineers. Anaheim, California. Feb. 4-5, 1988.
- B16. Ginsberg M J och Asay B W: "Commercial Carbon Composition Resistors as Dynamic Stress Gauges in Difficult Environments". The Review of Scientific Instruments, Vol. 62, No. 9, sid. 2218-2227. Sep., 1991.
- B17. Hollenberg K: "Time Resolved Pressure Measurement of the Initiation in Gap Test Experiments". Propellants, Explosives, Pyrotechnics. Vol. 11, sid. 155-161. 1986.
- B18: Ouchterlony F, Nie S, Nyberg U och Deng J: "Monitoring of Large Open Pit Cut Rounds by VOD, PPV and Gas Pressure Measurements". Proceedings of 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting - FragBlast 5. Montreal, Quebec, Canada. sid. 167-176. Aug. 25-29, 1996.