

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH
SveBeFo Rapport 12

BARRIÄRPROVSBESTÄMNING AV ETT EMULSIONSSPRÄNGÄMNES MINSTA INITIERINGSTRYCK

**The minimum initiation pressure of an emulsion
explosive determined by the Gap Test**

Shulin Nie, Junhua Deng, Ulf Nyberg, Algot Persson
SveBeFo

FÖRORD

SveBeFo:s forskningsprogram spänner över bergbyggandets olika stadier, från undermarksplanering och förundersökningar till berggutttag, förstärkning, tätning och långtidsbeständighet hos anläggningar i drift. Forskningen bedrivs till stor del med externa forskare vid högskolor och företag, medan specialområdet sprängningsteknik och sprängämnesforskning huvudsakligen genomförs med egna forskare, anställda vid SveBeFo.

Inom detoniken ("detonationsfysiken") är en huvuduppgift att öka kunskaperna om sprängämnens verkningssätt med målet att bättre utnyttja den tillgängliga energin i samband med bergbrytning. Forskningen innefattar både teoriutveckling och experiment för att verifiera uppställda samband mellan olika faktorer under detonationen. Dessa data sammanfattas i en s k brinnmodell för sprängämnet.

I brinnmodellen ingår tillståndsekvationer med materialdata för sprängämnet och de resulterande spränggaserna och en brinnekvation, som beskriver omsättningen i reaktionszonen. En viktig ingångsparameter är det erforderliga initieringstrycket för att sprängämnet skall detonera. Föreliggande rapport beskriver en serie försök med s k barriärprov för att bestämma detta tryck för ett emulsionssprängämne. Resultaten utgör med andra ord ett viktigt underlag för att beskriva detonationsförloppet.

Rapporten beskriver försöksprincipen för barriärprovet och det praktiska genomförandet samt utvärdering av resultaten enligt olika metoder. Senare kommer andra varianter av emulsionssprängämnen att provas för att ge ytterligare underlag till modellutvecklingen.

En referensgrupp bestående av representanter för Nitro Nobel, Kimit och FOA har följt och givit värdefulla synpunkter på forskningsarbetet, som i huvudsak har genomförts inom ramen för SveDeFo:s tidigare ramprogram 1990 - 93 med Algot Persson som projektledare.

Stockholm i september 1994

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Det minsta initieringstrycket hos ett sprängämne är en viktig parameter i brinnmodeller som beskriver detonations- och förbränningsförlopp. Genom att använda det traditionella barriärprovet har detta tryck bestämts till 1,64 GPa för ett forskningssprängämne, kallat emulsion K1, i plexiglasrör med laddningsdiametern 36 mm. Rapporten beskriver försöksprincipen, praktiskt utförande och resultaten av själva barriärprovet, kalibreringen av detta och beräkningsdelen med impedansanpassningsmetoden. En stigtidsanalys har också utförts för mätsystemet och en datasimulering med programmet DYNA2D genomfördes för att verifiera resultaten.

Nyckelord: emulsionssprängämne, barriärprov, minsta initieringstryck, EMV-mätning, Hugoniot, impedansanpassningsmetod

THE MINIMUM INITIATION PRESSURE OF AN EMULSION EXPLOSIVE DETERMINED BY THE GAP TEST

EXTENDED SUMMARY

The minimum initiation pressure of an explosive is an important parameter for the burning model describing the burning and/or detonation process in that explosive. By using the traditional Gap Test method, this pressure has been determined for a research explosive named Emulsion K1 in a plexiglass (PMMA) tube with charge diameter ϕ 36 mm. See Table 1 for the composition of K1. This report describes the whole determination process including Gap Test, Calibration of Gap Test and calculation using the impedance-match method.

The Gap Test done was of traditional donor - gap - acceptor configuration, see Fig. 1, and the gap material was PMMA. The critical gap length determined for explosive K1 is 37.4 mm, see Fig. 3.

The Calibration of the Gap Test has been carried out by measuring in the gap the dependence of the particle velocity on the length of the gap, eq. 7. Then this particle velocity - gap length relation was converted into a pressure - gap length relation, eq. 8, since the Hugoniot of the PMMA was known from earlier experiments as, eq. 1:

$$U_s = 2431 + 1.392 \cdot U_p$$

Here: U_s = shock wave velocity (m/s) and U_p = particle velocity (m/s).

An electro-magnetic technique was employed in the measurement of the particle velocity in the PMMA gap. Figs. 4 and 5 show details of the experimental set-up. The EMV gage was made of 25 μ m thick aluminium foil with 5 mm active length and was glued into the gap. The electro-magnetic coils were made of 225 loops of copper wire and powered by a 105 A current from a group of batteries. The separation between the coils was 192 mm during the measurements, in the middle of which a magnetic field of strength about 110 mT was achieved. Furthermore, the field fluctuation was less than 0.1% in a central region as large as 64x64x40 mm, see Fig. 6.

The output signals from the EMV-gages were very reproducible, see signals in Appendix 1. The values of the peak particle velocity were read from those signals by extrapolating the signals back to the rise time zero, see Fig. 7.

A rise time analysis has been carried out on the measuring system. It showed that the theoretically shortest rise time in the system is 20 to 28 ns while the measured rise time in the recorded signals was between 30 and 50 ns. This means that the system has worked very well.

From the Calibration of the Gap Test, it was determined that the critical pressure corresponding to the critical gap length is 1.84 GPa.

Besides, a computer simulation using the DYNA2D program has also been performed on the Calibration of the Gap Test. The simulation results agreed quite well with the experiments.

Finally, the impedance-match method has been applied to calculate the minimum initiation pressure of explosive K1, which was determined to be 1.64 GPa, see Fig. 13.

In order to perform the calculation, the Hugoniot relation for the unreacted explosive is necessary and has been determined in the following way. First the Hugoniot relation for the explosive matrix was determined experimentally, eq. 12:

$$U_s = 2260 + 1.554U_p$$

Then by regarding the explosive as a homogeneous mixture of the matrix and an ideal gas, i.e. by treating the microballoon volumes as an ideal gas, a Hugoniot relation was calculated for the explosive K1, eq. 13:

$$U_s = 1788 + 1.503U_p$$

Keywords: emulsion explosive, Gap Test, minimum initiation pressure, EMV-gage, Hugoniot, impedance-match method

INNEHÅLL

	sid
1 INLEDNING	5
2 DET UNDERSÖKTA SPRÄNGÄMNET	6
3 EXPERIMENTELL BESTÄMNING AV DEN KRITISKA BARRIÄRLÄNGDEN - BARRIÄRPROVET	7
3.1 Princip, uppställning och utförande	7
3.2 Den kritiska barriärlängden	11
4 EXPERIMENTELL BESTÄMNING AV PARTIKELHASTIGHETEN I BARRIÄREN - KALIBRERING AV BARRIÄRPROVET	13
4.1 Princip, uppställning och utförande	13
4.2 Resultat och analys	20
4.2.1 Partikelhastighet och stöttryck i barriären	20
4.2.2 Stigtidsanalys	24
4.2.3 Datasimulering med DYNA2D	25
5 BERÄKNING AV DET MINSTA INITIERINGSTRYCKET - IMPEDANSANPASSNINGSMETODEN	30
5.1 Materialdata för beräkning	31
5.2 Beräkningsutförande	32
6 SLUTSATSER OCH DISKUSSIONER	35
ERKÄNNANDEN	37
REFERENSER	39
BILAGA 1: REGISTRERINGAR FRÅN KALIBRERING AV BARRIÄRPROVET	41
BILAGA 2: STIGTIDSANALYSEN FÖR MÄTSYSTEMET	45

1 INLEDNING

Detonationen i ett sprängämne kan initieras genom att utsätta det för stötvågen från en detonerande sprängladdning. Stötvågens amplitud och varaktighet avgör huruvida sprängämnet blir initierat. Begreppet "minsta initieringstryck" är en sprängämnesegenskap som anger sprängämnets känslighet för stötinitiering. Det beskriver vid vilket tryck den kemiska reaktion startar som leder till att en detonation i sprängämnet påbörjas. Därför är det också en viktig parameter för en numerisk beskrivning av detonations- och förbränningsförloppen i ett sprängämne.

En direkt mätning av det minsta initieringstrycket med exempelvis tryckgivare är praktiskt svår. För att kringgå svårigheten har en metod utvecklats. Metoden består av tre steg: två experimentella delar och en beräkningsdel.

De experimentella delarna är relativt enkla tack vare de färdigutvecklade försöksmetoderna: barriärprovet och kalibreringen av detta. För att kunna utföra beräkningarna efter impedansanpassningsprincipen, måste man ha ytterligare information om några materialegenskaper.

I SveDeFo:s ramprogramsprojekt K1 för 1990-1993, "Tillståndsekvationer och brinnmodeller för kommersiella sprängämnen" /1/ skulle bl a en brinnmodell utvecklas för ett emulsionssprängämne. De ingående modellparametrarna inkluderar bl a det minsta initieringstrycket /2/. Därför genomfördes en serie barriärprov och kalibreringar av barriärprovet för sprängämnet som här kallas emulsion K1.

I de följande avsnitten 3, 4 och 5 beskrivs metodprincipen, det praktiska utförandet och resultaten för de tre stegen.

Detta är en delrapport i avrapporteringen av projekt K1. Ytterligare delrapporter är /3/, /8/ och /14/.

2 DET UNDERSÖKTA SPRÄNGÄMNET

Det undersökta sprängämnet är ett ammoniumnitratbaserat emulsionssprängämne, som vi kallar K1, tillverkat av Kimit AB. De kemiska komponenterna och känsliggöringsmedel framgår av tabell 1.

Sprängämnet har en densitet mellan 1,16 och 1,17 g/cm³ medan matrisen har en densitet av 1,38 g/cm³ vid normal temperatur. Den kritiska diametern är mindre än 13,6 mm /3/ för en friliggande laddning. Andra detonationsegenskaper som detonationshastigheten rapporteras också i /3/.

Tabell 1: Komponenter i emulsionssprängämne K1 / *Composition of emulsion explosive K1.*

<u>Ämne</u>	<u>Vikt-%</u>
Ammoniumnitrat	77
Vatten	14,7
Olja	3,9
Emulgeringsmedel	0,7
Mikrosfärer B23/500*	3,7

*: Mikrosfärerna är tillverkade av 3M Co.

3 EXPERIMENTELL BESTÄMNING AV DEN KRITISKA BARRIÄRLÄNGDEN - BARRIÄRPROVET

3.1 Princip, uppställning och utförande

Principen för försöket är att en stötvåg från en detonerande sprängladdning dämpas genom en barriär innan den träffar och eventuellt initierar det sprängämnesprov som undersöks. Genom att variera barriärens längd varieras stötvågens amplitud på sprängämnesprovet. Den kritiska barriärlängden definieras av att sannolikheten att sprängämnesprovet blir initierat är 50%. Detta försök, som bestämmer den kritiska barriärlängden, kallas för barriärprov eller "Gap Test" i engelsk litteratur /4, 5/.

Vår försöksuppställning är traditionell, dvs givarladdning - barriär - mottagarladdning och illustreras i figur 1.

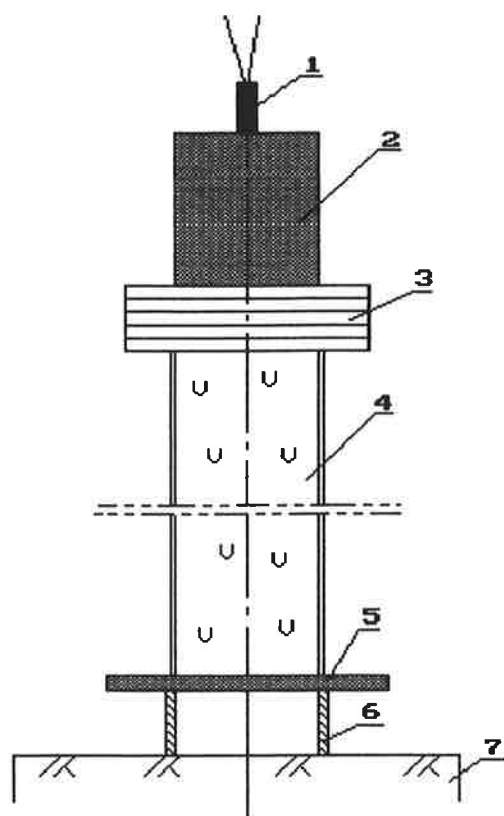
Givarladdningen är källan till stötvågen. För att få reproducerbara stötvågor ställs höga krav på givarladdningen. Därför brukar den vara ett militärt sprängämne med mycket god funktion och välkända detonationsegenskaper. I vår försöksserie var den en cylinder av pressad PETN (ϕ 35 mm x 60 mm). Densiteten är 1,50 g/cm³ och detonationshastigheten 7450 m/s. Laddningen initierades med en elektrisk VA sprängkapsel nr 8.

Valet av barriärmaterial är väsentligt. Dels måste materialets stötegenskaper t ex dess stöt-Hugoniot vara känd för att kunna utföra beräkningen i avsnitt 5. Dels bör det ha lämpliga mekaniska egenskaper för att underlätta hantering och bearbetning. Plexiglas (PMMA) är ett utmärkt val och används ofta i barriärprov /6/. Dess stöt-Hugoniot har undersökts av många forskare, t ex Kinslow /7/. Det plexiglas som användes i vårt barriärprov har en normal densitet 1185 kg/m³ och dess Hugoniot har av oss bestämts i en annan försöksserie /8/ :

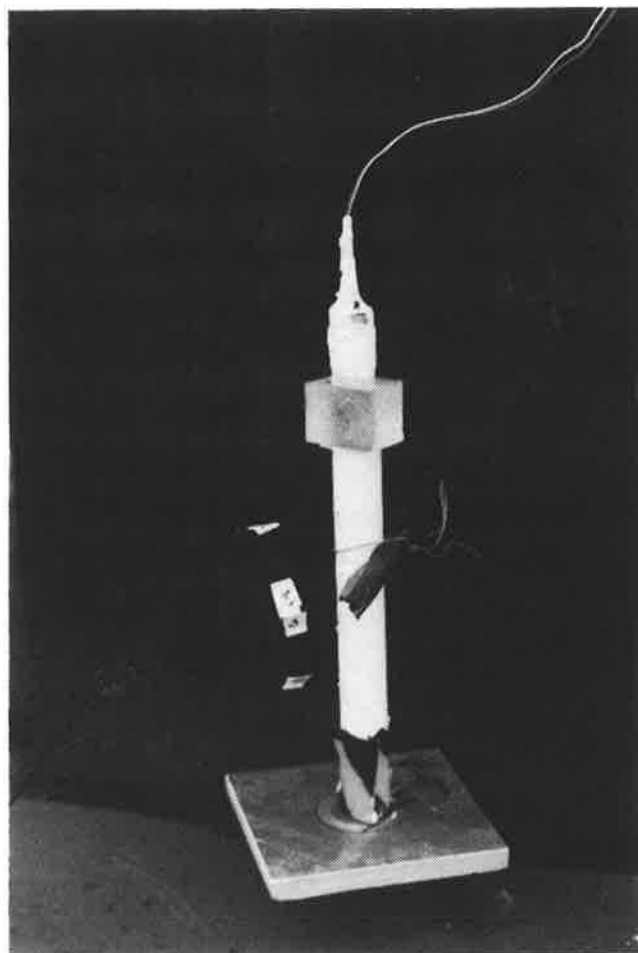
$$U_s = 2431 + 1,392 \cdot U_p \quad (1)$$

Där U_s = stötvågens hastighet i materialet (m/s)

U_p = partikelhastigheten i materialet (m/s)



a)



b)

- 1: elektrisk sprängkapsel (nr 8 Typ VA) / *electric detonator (No. 8 Type VA)*
- 2: givarladdningen (pressad PETN, ϕ 35 mm x 60 mm, $\rho_0 = 1,50 \text{ g/cm}^3$) / *donor charge (pressed PETN, ϕ 35 mm x 60 mm, $\rho_0 = 1.50 \text{ g/cm}^3$)*
- 3: PMMA barriär / *PMMA card gap*
- 4: sprängämne K1 i PMMA rör / *explosive K1 in PMMA tube*
- 5: aluminium vittnesplata (20x200x200 mm) / *aluminium witness plate (20x200x200 mm)*
- 6: stålring / *steel ring*
- 7: tjock stålplata / *thick steel plate*

Figur 1: Uppställning för barriärprov / *Set-up of the Gap Test.*

a): skiss / *illustration* b): foto / *photo*

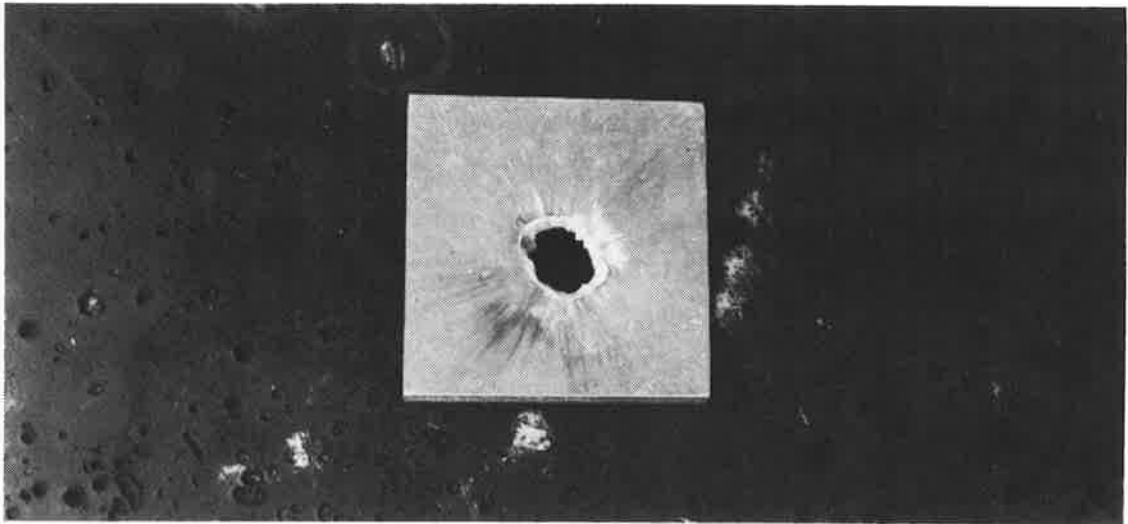
I vårt barriärprov har PMMA-skivor med arean $45 \times 45 \text{ mm}^2$ tillverkats av plattor med olika tjocklek och tjockleken på barriären, dvs barriärlängden, varierats genom kombinationer av skivorna. Den exakta barriärlängden mättes med skjutmått före skottet.

Mottagarladdningen är det sprängämne som undersöks, i vårt fall emulsionssprängämnet K1. Laddningsdiametern är 36 mm och längden 300 - 325 mm. Diametern är mycket större än den kritiska diametern (mindre än 13,6 mm) och längden större än åtta gånger diametern, vilket anses att vara längre än det sk "run-up" avståndet. Det innebär att om initiering skett så har detonationen i mottagarladdningen kunnat bli stabil innan den når slutet av laddningen.

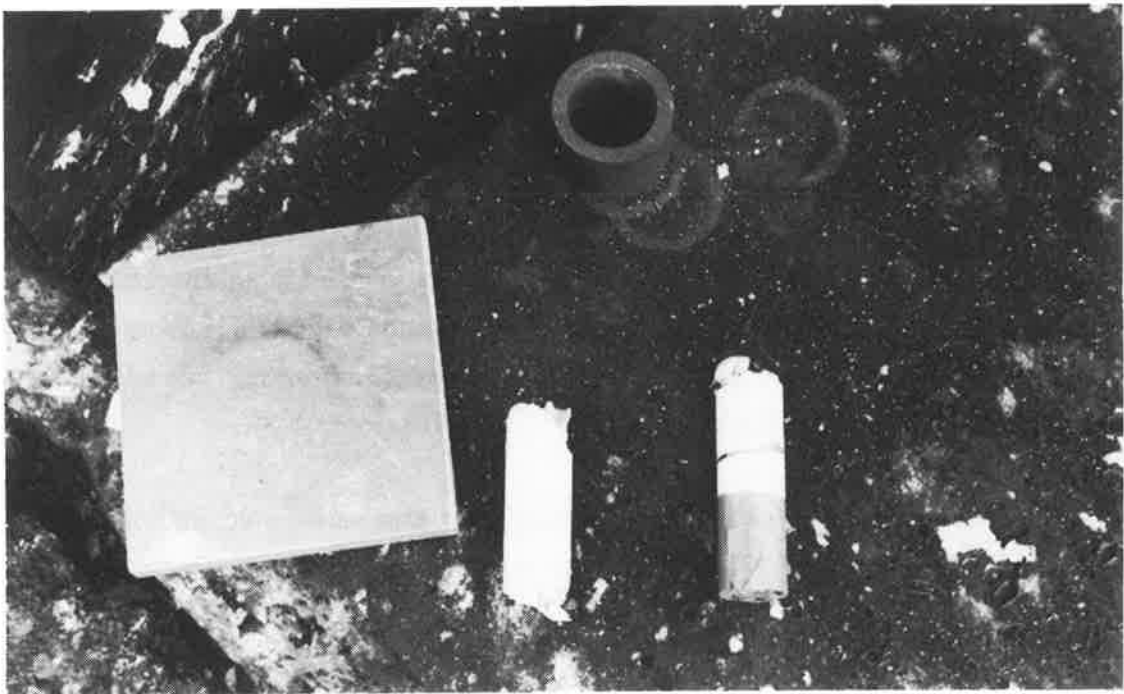
Mottagarladdningens inneslutning är ett 2 mm tjockt PMMA-rör, vilket är det samma som använts i andra försök med emulsionssprängämne K1, t ex /3/. På så sätt kan resultaten från olika försök användas direkt i brinnmodellsutvecklingen. Fyra ϕ 3 mm:s hål med avståndet 50 mm borrades längs PMMA-röret för montering av optiska fibrer i syfte att följa detonationen i sprängämnet.

Detonationen i mottagarladdningen bekräftas av en vittnesplatta (20x200x200 mm) av aluminium och de fyra optiska fibrerna. Om mottagarladdningen detonerar, blir plattan urstansad eller svårt deformerad. Dessutom kommer signaler från de optiska fibrerna. Om mottagarladdningen inte initieras eller initieringen är så svag att den inte orsakar någon detonation i mottagarladdningen, kan vittnesplattan återfinnas intakt och signalerna från de optiska fibrerna uteblir. Det finns också delar från alla icke detonerade laddningar kvar på försöksplatsen.

Figur 2 är två exempel på återfunna vittnesplattor som visar en detonation i fall a) och ingen detonation i fall b). I figur 2 b kan man även se en kvarliggande icke detonerad mottagarladdning.



a)



b)

Figur 2: Två exemplar av återfunna vittnesplattor efter försöket / *Two examples of the witness plates recovered after the Gap Test.*

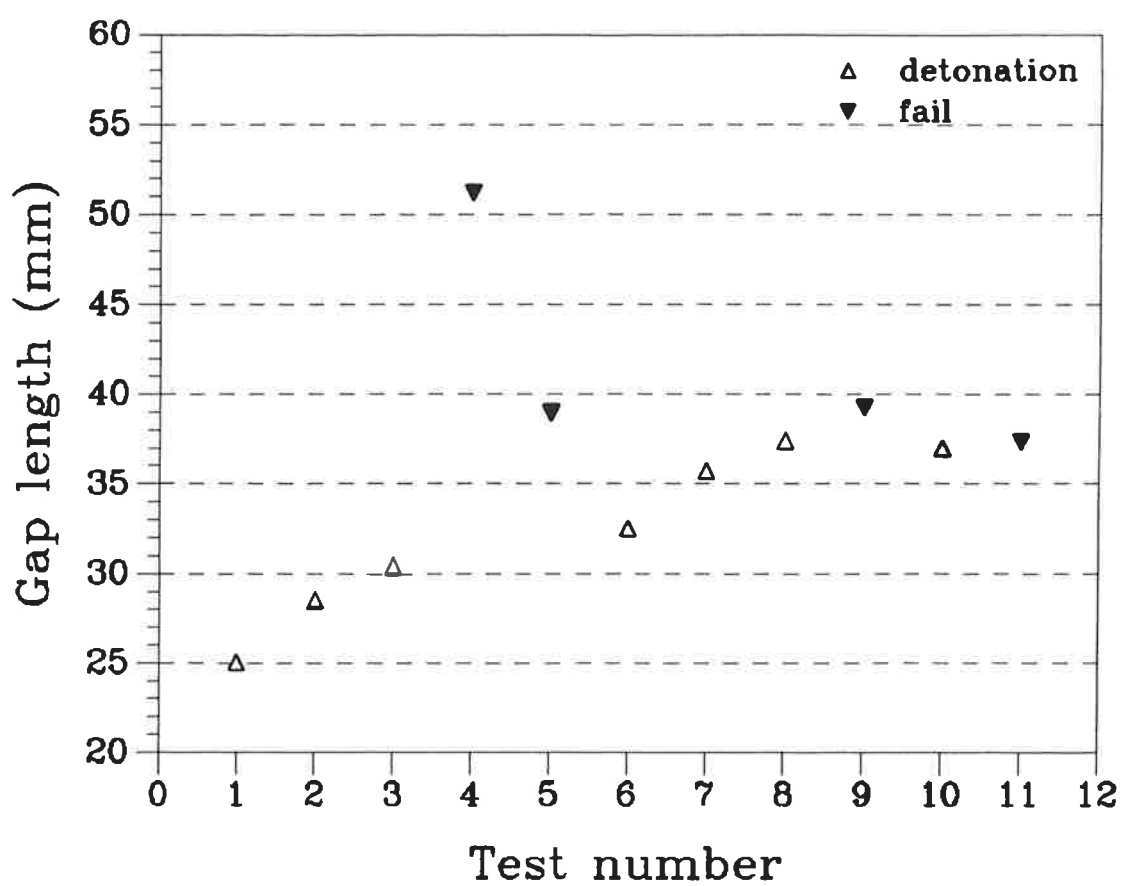
3.2 Den kritiska barriärlängden

Elva skott sköts och resultaten har sammanställts i tabell 2. Den kritiska barriärlängden visas i figur 3. Den uppskattas till 37,4 mm för emulsion K1 i ϕ 36 mm PMMA-rör.

Tabell 2: Resultaten från barriärprovet / *Results of the Gap Test.*

Skott nr	Barriärlängden (mm)	Mottagarlängden (mm)	Detonation i mottagare ? (Ja/Nej)
1	25,0	314	J
2	28,5	320	J
3	30,4	321	J
4	51,2	300	N
5	39,0	305	N
6	32,5	323	J
7	35,7	322	J
8	37,4	312	J
9	39,3	325	N
10	37,0	320	J
11	37,4	320	N

Försöksantalet är måttligt. Om resultaten skall analyseras med "Up/Down" metoden /9/ bör vi ha flera testdata för att få en bra statistik. Med hänsyn till ojämnheter i kommersiella sprängämnen som emulsioner kommer flera skott troligen inte att förbättra uppskattningen av den kritiska barriärlängden nämnvärt. Därför har vi inte använt "Up/Down" metoden i analysen.



Figur 3: Försöksresultaten från barriärprovet / Results of the Gap Test.

4 EXPERIMENTELL BESTÄMNING AV PARTIKELHASTIGHETEN I BARRIÄREN - KALIBRERING AV BARRIÄRPROVET

4.1 Princip, uppställning och utförande

Den kritiska barriärlängden som bestämdes i det förra experimentet är ett relativt mått på det kritiska stöttryck som måste överföras till mottagarladdningen för att den skall detonera. Värdet beror i högsta grad på barriärens materialegenskaper. I detta steg bestäms stötvågsamplituden i slutet av den kritiska barriärlängden.

Metoden går ut på att först fastställa hur stötvågsamplituden beror på barriärlängden. Sedan räknas den kritiska amplitud i barriären ut, som motsvarar den kritiska barriärlängden.

Stötvågsamplituden i ett material kan teoretiskt beräknas enligt följande ekvation:

$$P = \rho_0 \cdot U_s \cdot U_p \quad (2)$$

Här är P stötvågsamplituden i Pa. Storheterna ρ_0 , U_s och U_p har förklarats i ekv 1 som är plexiglasets Hugoniot.

Detta ger antingen:

$$P = 2,88 \cdot 10^6 \cdot U_p + 1,65 \cdot 10^3 \cdot U_p^2 \quad (3)$$

eller:

$$P = 851 \cdot U_s^2 - 2,07 \cdot 10^6 \cdot U_s \quad (4)$$

Därför kan man kringgå svårigheterna med en direkt tryckmätning genom att mäta antingen partikelhastigheten eller stötvågens hastighet i barriären. Experimentet med att bestämma hastighetens avståndsberoende kallas för kalibrering av barriärprovet (Calibration of Gap Test) /4/.

Mätning av stötvågens hastighet längs barriären med hjälp av höghastighetskamera har visat sig vara relativt onoggrann /4/. Numera mäter man istället partikelhastigheten med hjälp av en elektromagnetisk metod, en sk EMV (Electro-Magnetic Velocity) metod /6/.

EMV metoden baseras på Faraday's lag. När en elektriskledare rör sig tvärs ett magnetiskt fält genereras en elektrisk spänning över ledaren. Om rörelsens riktning är vinkelrätt mot fältet och fältstyrkan är konstant, blir spänningens storlek direkt proportionell mot ledarens hastighet, i vårt fall en folies hastighet, enligt ekv 5.

$$EMK = B \cdot L \cdot U_p \quad (5)$$

Där: EMK = elektromotorisk kraft dvs elektrisk spänning (V)

B = fältstyrkan (T)

L = foliens längd (m)

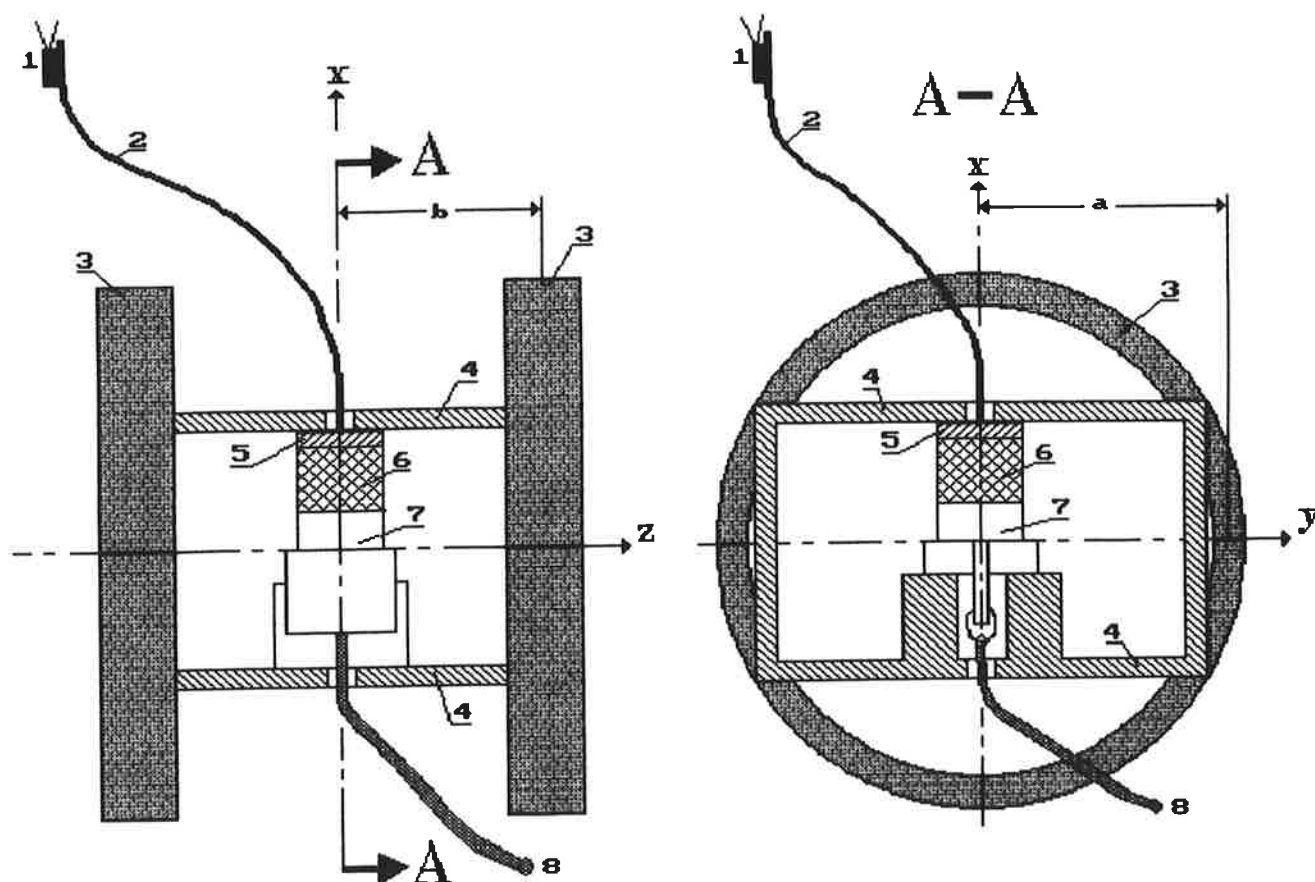
U_p = partikelhastigheten (m/s)

I kalibreringen av barriärprovet inbäddades en bit aluminium- eller kopparfolie i den icke-ledande PMMA-barriären så att den förflyttar sig med barriärmaterialet. Spänningen över folieslingan mäts och foliens hastighet kan beräknas ur ekv 5. Den hastigheten motsvarar alltså partikelhastigheten där folien är placerad.

Vår försöksuppställning visas i figur 4. Detaljer från konstruktionen och inbäddningen av EMV-givaren i PMMA-barriären visas i figur 5.

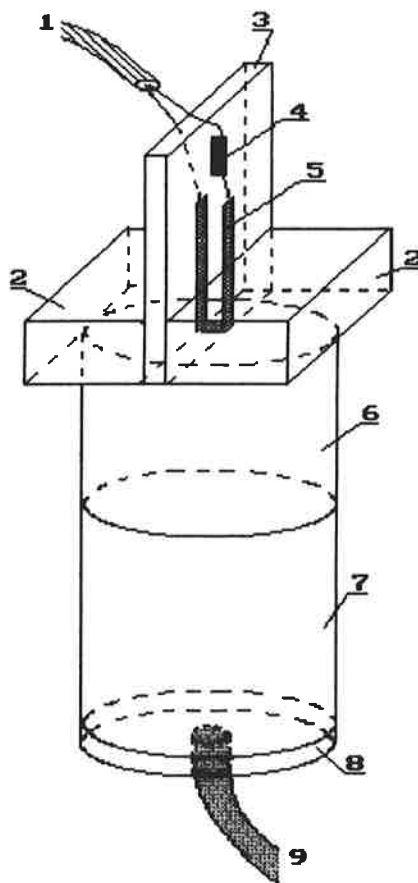
Spolarna i figur 4 hängs upp i taket i sprängtanken. Varje spole har tillverkats av 225 varv kopparledare med medeldiametern 405 mm. Drivkraften är 9 st 12 V bilbatterier och drivströmmen cirka 108 A.

Fältstyrkan i centrum av det magnetiska fält som genereras mellan spolarna kan bestämmas ur formeln i ekv 6.



- 1: elektrisk sprängkapsel (nr 8, special typ med HX20 tändpärla) / *electric detonator (No. 8, special type with HX20 fuse head)*
- 2: pentylstubin (10 g/m) / *detonating cord (10 g/m)*
- 3: elektromagnetiska spolar / *electro-magnetic coils*
- 4: spånskiveram / *frame of particle board*
- 5: plastbricka för centrering av pentylstubinen på givarladdningen (ϕ 35 mm x 5 mm med ϕ 5,3 mm i mitten) / *thin plastic plate for centering of the detonating cord on the donor charge (ϕ 35 mm x 5 mm with ϕ 5.3 mm hole in the middle)*
- 6: givarladdningen (pressad PETN, ϕ 35 mm x 60 mm, $\rho_0 = 1,50 \text{ g/cm}^3$) / *donor charge (pressed PETN, ϕ 35 mm x 60 mm, $\rho_0 = 1.50 \text{ g/cm}^3$)*
- 7: PMMA-barriären med inbäddad EMV-givare, se detalj i figur 5 / *the PMMA-gap with the embedded EMV-gages, see details in Figure 5*
- 8: koaxialkabel (50 Ω) / *coaxial cable (50 Ω)*

Figur 4: Försökupställning för kalibrering av barriärprovet / *Experimental set-up for Calibration of the Gap Test.*



- 1: koaxialkabel (50 Ω) / coaxial cable (50 Ω)
- 2: PMMA-block (19,5x29x40 mm) / PMMA-block (19.5x29x40 mm)
- 3: PMMA-skiva (5x40x65 mm) / PMMA-slab (5x40x65 mm)
- 4: motstånd (50 Ω) / resistance (50 Ω)
- 5: EMV-givaren (25 μ m aluminium folie) / the EMV-gage (25 μ m aluminium foil)
- 6: cylindrisk PMMA-barriär (φ 40 mm) / cylindrical PMMA-gap (φ 40 mm)
- 7: givarladdning (se figur 4) / the donor charge (see Figure 4)
- 8: plastbricka (se figur 4) / plastic plate (see Figure 4)
- 9: pentylstubin (10 g/m) / detonating cord (10 g/m)

Figur 5: Konstruktion och montering av EMV-givaren / Construction and assembling of the EMV-gages.

$$B_z = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot I \cdot N \cdot a^2 / (a^2 + b^2)^{3/2} \quad (6)$$

Här: B_z = fältstyrkan i axiell riktning, z-axeln i figur 4 (T)

I = drivström (A)

N = varvtal i spole

a = medelradien hos spolen (m), se figur 4

b = halva avståndet mellan spolarna (m), se figur 4

I vårt fall har vi följande typiska värden:

$$a = 0,2025 \text{ m}$$

$$b = 0,192/2 = 0,096 \text{ m, se senare beskrivning i rapporten}$$

$$I = 108 \text{ A}$$

$$N = 225$$

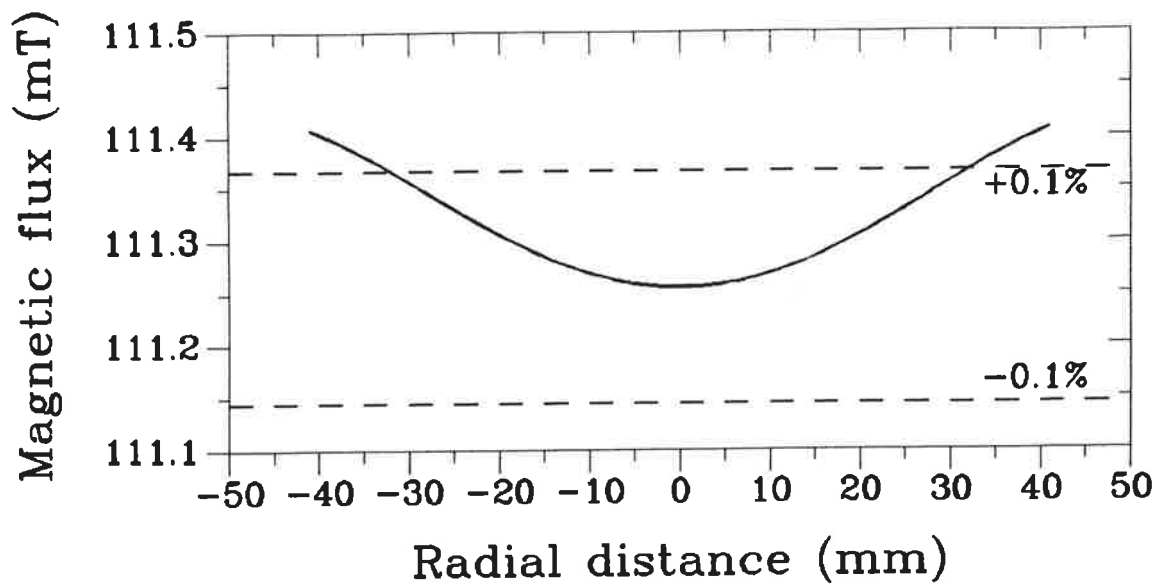
Vi erhåller då: $B_z \approx 111 \text{ mT}$.

Fältstyrkan i centrum har mätts vid flera tillfällen med en fluxometer och mätvärdet stämmer mycket bra med det beräknade. Felet är inom 2%.

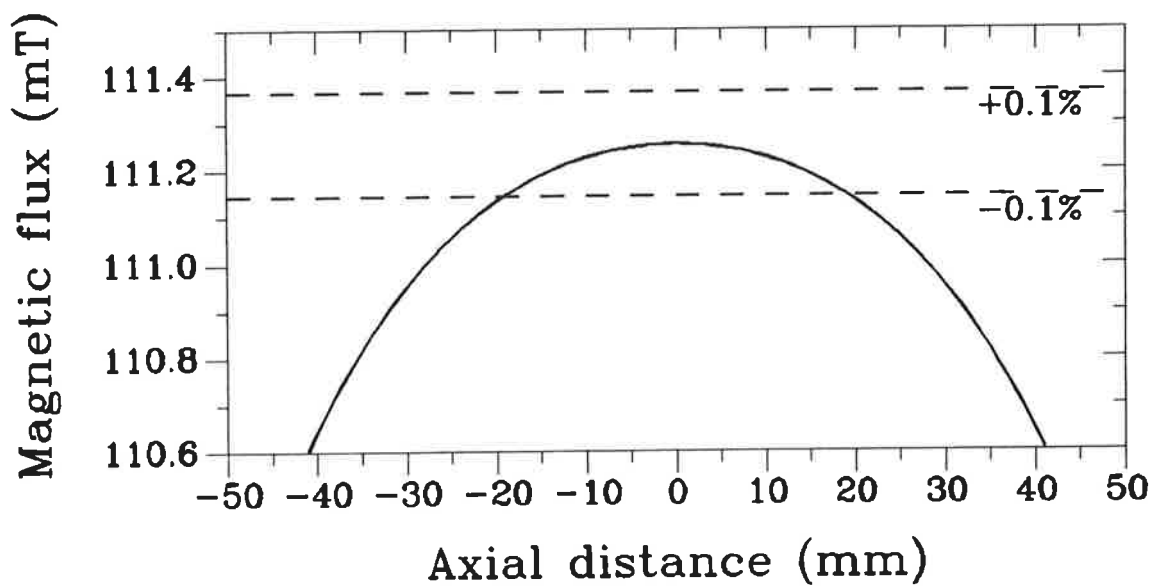
Vid varje försök mättes avståndet mellan spolarna (2b) och strömmen (I) genom spolarna och den aktuella fältstyrkan beräknades enligt ekv 6. Resultaten har sammanställts i tabell 3 i avsnitt 4.2 av rapporten.

Fältet mellan spolarna är emellertid inte helt homogent. Det varierar något både axiellt (i z-riktningen enligt figur 4) och radiellt (i x- eller y-riktningen enligt figur 4). Junhua Deng på SveBeFo har skrivit ett dataprogram, med vilket man kan beräkna hur fältet varierar mellan spolarna. Figuren 6 a och b visar fältstyrkans beräknade variationer längs x- och z- axlarna för vår uppställning.

Enligt figur 6 a och b kan fältet i det område kring centralpunkten, där EMV-givare sitter, betraktas som någorlunda homogent och konstant. I ett så stort utrymme som 64x64x40 mm (64 mm i x- eller y-riktningen och 40 mm i z-riktningen) är fältets variationer mindre än 0,1%. Detta innebär praktiskt att mätfel som orsakas av



a)



b)

Figur 6: Variationen hos fältstyrkans axiella komponent mellan spolarna / *The fluctuation of the axial component of the field between the coils.*

a): i radiell riktning / *in radial direction*

b): i axiell riktning / *in axial direction*

fältvariationen är mindre än 0,1% i vårt försök, även om EMV-givaren inte sitter precis i fältets centrum.

EMV-givaren är gjord av en 25 μm tjock aluminiumfolie. Den aktiva längden, dvs den del av givaren som skär fältets flödeslinjer och genererar spänning när den flyttar sig, är 5 mm. Foliens bredd är ca 2-3 mm, vilket bedöms inte märkbart påverka EMV-signalens stigtid eller amplitud, se avsnitt 4.2.

Som framgår av figur 5, är folien först bockad runt en sida av den 5 mm tjock PMMA-skivan. Sedan limmades med plexiglaslim ett PMMA-block (block 2 i figur 4) på var sida av skivan så att folien fixerades. Till sist, när limmet härdat, limmades PMMA-blocken och skivan med folien som en helhet på en PMMA-cylinder.

Alla kontaktytor frästes vid tillverkning av delarna och är mycket släta och jämna. Före limning rengjordes de med lösningsmedel.

Limmet härdade under tryck. Under försökens gång har vi lärt oss att tryckets storlek måste kontrolleras noga för att få ett bra limningsresultat. Om trycket är för lågt, erhålls bubblor som bildas av att lösningsmedel stannar kvar i det härdade limmet. Om trycket är för högt, bildas sprickor i det härdade limmet av avlastning i limmet när trycket avlastas.

Varje bubbla eller spricka skapar en diskontinuitet i barriären och påverkar mätresultatet. I vårt försök har ett optimalt tryck utexperimenterats så att ingen spricka eller bubbla bildas under eller kring givaren.

Placeringen av hoplimmad givarladdning, barriär och EMV-givare i det magnetiska fältet sker med hjälp av en spånskiveram, se figur 4. Ramen är en viktig del av uppställningen. Den håller spolarna parallella på ett givet avstånd. Dessutom underlättar den centreringen av EMV-givaren till den del av fältet som är homogent.

Det givna avståndet mellan spolarna är 192 mm men det varierade något i försöken. Mätvärdena har sammanställts i tabell 3 i avsnitt 4.2.

För att undvika en eventuell störning av det magnetiska fältet av metallsplitter från sprängkapseln hålls kapseln utanför fältet. Initiering av givarladdningen skedde med en

10 g/m pentylstubin som i sin tur initierades av en special elektrisk sprängkapsel nr 8 med HX20 tändpärla. Kapseln har en reaktionstid $10 \mu\text{s} \pm 0,1 \mu\text{s}$.

Signalerna från EMV-givarna och drivströmmen registrerades på två LeCroy digitaloscilloskop med 1 ns samplingsintervall.

4.2 Resultat och analys

Mätdata och resultaten har sammanställts i tabell 3. Till vänster i tabellen finns uppställningsparametrarna. Till höger finns resultaten baserade på signalerna från EMV-givarna och den dataanalys som beskrivs i följande delavsnitt.

Totalt har åtta skott skjutits men registreringen från ett skott, nr 6, förlorades under dataöverföringen och därför ingår det inte i analysen. Sju EMV registreringar har sammanställts i Bilaga 1. Kvaliteten på signalerna är mycket hög liksom reproducerbarheten.

4.2.1 Partikelhastighet och stöttryck i barriären

När en stötvåg utbreder sig i ett material, t ex PMMA-barriären i vårt försök, uppstår det en partikelhastighets- och tillståndsdiskontinuitet i materialet vid stötfronten. Med andra ord ändras partikelhastigheten i barriären från 0 till U_p på nära nolltid i vårt fall. Att mäta denna förändring direkt är omöjligt pga den begränsade stigtid som mätsystemet har, se avsnitt 4.2.2. Därför måste man extrapolera den befintliga signalen på ett eller annat sätt för att uppskatta språnget i U_p . Ju kortare systemets stigtid är, desto noggrannare är det extrapolerade värdet.

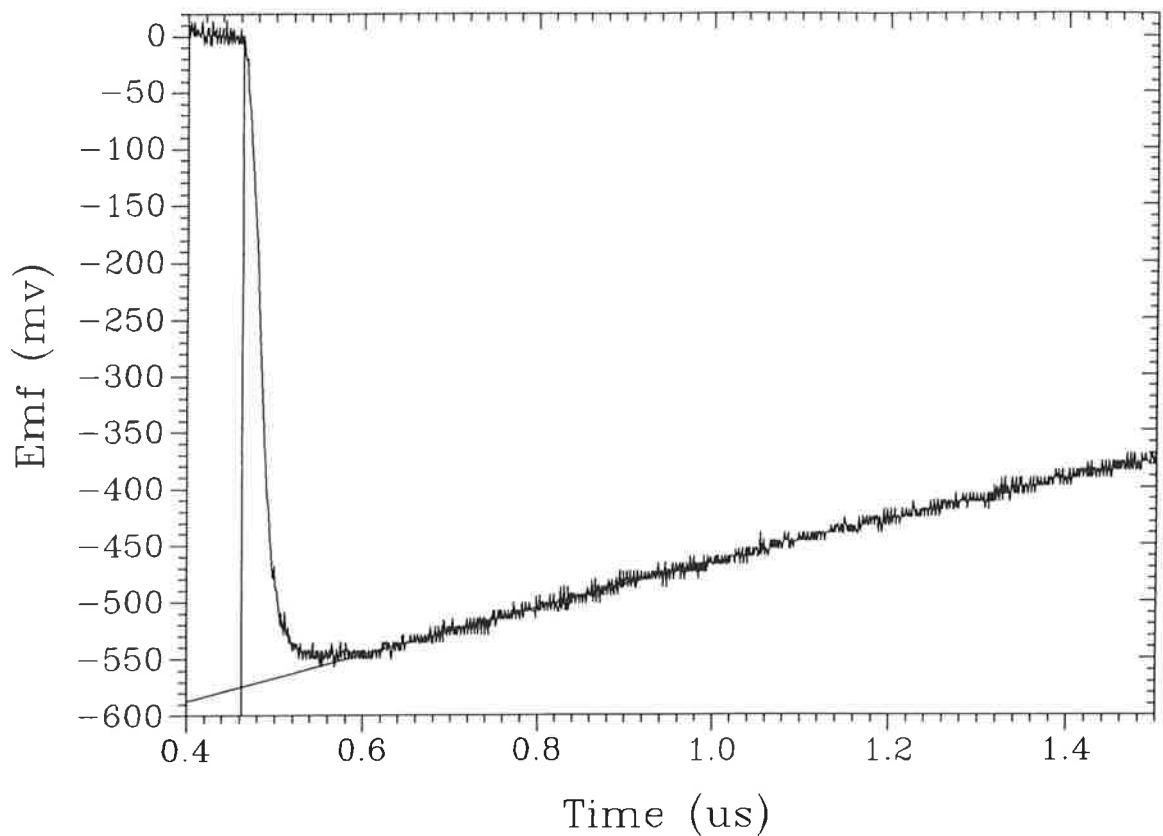
I vår analys har ett väsentligen linjärt signalsegment närmast signalens maximum valts ut. En rak linje genom segmentet extrapolerades till noll stigtid. Det så erhållna värdet ger en uppskattning av det språng i partikelhastigheten (U_p) som skulle mätas med ett idealt mätsystem, dvs ett system utan stigtid. Figur 7 är ett exempel, skott nr 1. Signal-segmentet mellan tiderna 0,7 och 1,0 μs utvaldes och extrapolerades. Den extrapolerade spänningen är 575 mV och motsvarande partikelhastigheten är 1050 m/s enligt ekv 5.

Tabell 3: Resultaten från kalibreringen av barriärprovet / *Results of the Calibration of the Gap Test.*

Skott nr	Spolarnas avstånd 2b (mm)	Ström I (A)	Fält ^{a)} styrkan B (mT)	Barriär längden (mm)	EMK (mV)	Signal stigtid τ (ns)	Partikel hastighet U_p (m/s)	Stötvågens ^{a)} hastighet U_s (m/s)	Stöttryck ^{a)} P (GPa)
1	191	106	110	24,8	575	31,5	1050	3893	4,84
2	190	104	108	24,5	558	30,2	1036	3873	4,76
3	192	105	108	29,4	425	49,2	786	3525	3,28
4	192	106	109	29,4	439	39,1	804	3550	3,38
5	192	105,5	109	34,4	325	31,2	598	3263	2,31
6	192	105,5	109	34,1	~321 ^{b)}	—	~590 ^{b)}	~3252 ^{b)}	~2,27 ^{b)}
7	192	113	116	38,8	271	29,2	466	3079	1,70
8	192	113	116	39,0	256	30,8	440	3043	1,59

a): Fältstyrkan beräknades enligt ekv 6, stötvågens hastighet enligt ekv 1 och stöttryck enligt ekv 2

b): Signalen från detta skott förlorades senare under dataöverföringen. Värdena här baseras på en signalanalys som utfördes direkt efter skottet innan vidare databehandling skett. Dessa värden ingår inte i de fortsatta resultatanalyserna

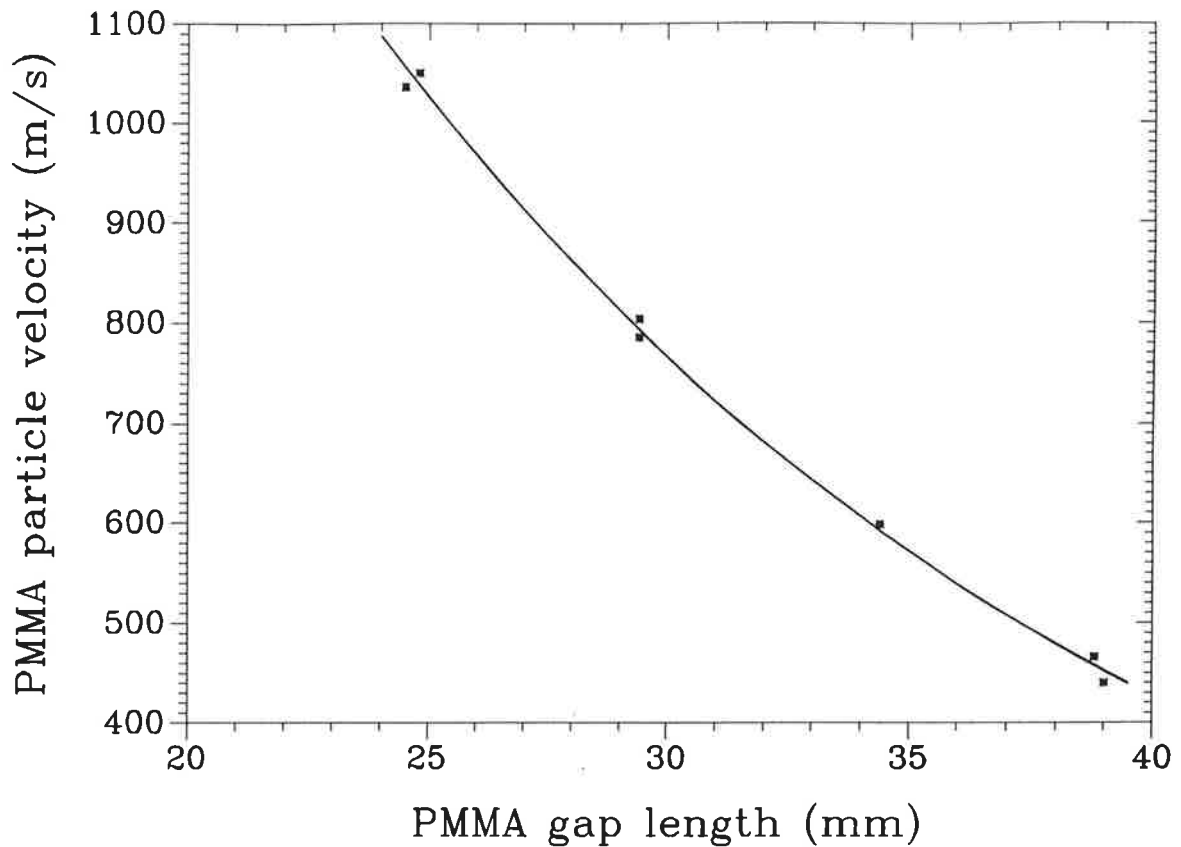


Figur 7: Linjär extrapolering av signalen för att få ut värdet vid noll stigtid / *Linear extrapolation of the signal back to the rise time zero.*

Extrapolerade partikelhastigheter (U_p) från alla skott redovisas i tabell 3 och har plottats mot avståndet längs barriären i figur 8. Deras avståndsberoende kan beskrivas med ekv 7.

$$U_p = 4429,3 \cdot e^{-0,0585x} \quad (7)$$

Här är x avståndet i mm mellan EMV-givaren och gränsytan mellan givarladdning-barriär och U_p ges i m/s.

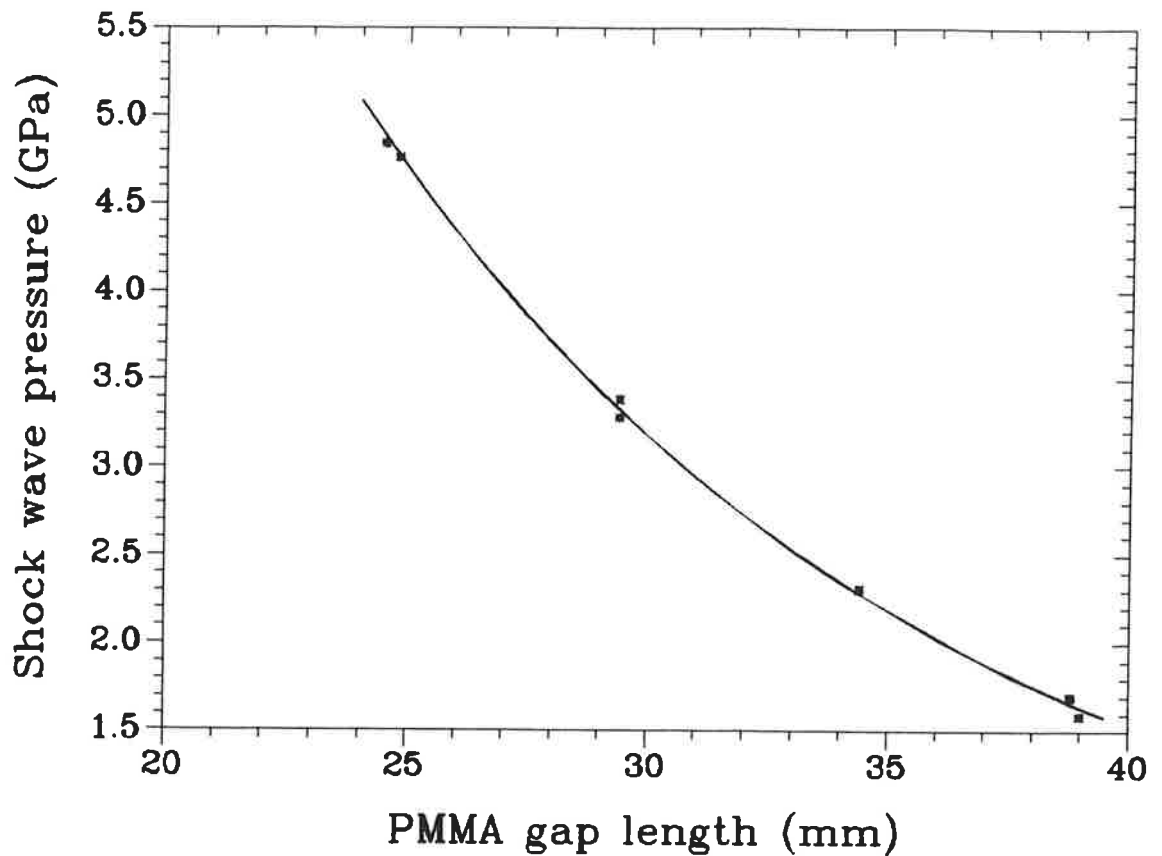


Figur 8: Avståndsberoendet hos partikelhastigheten i PMMA-barriären / *The dependence of the particle velocity on the distance along the PMMA-gap.*

Med hjälp av ekv 3 blir stöttryckets avståndsberoende också känt. Det plottas i figur 9 och kan beskrivas med ekv 8.

$$P = 12,76 \cdot e^{-0,0585x} + 32,37 \cdot e^{-0,117x} \quad (8)$$

Vid den kritiska barriärlängden, $x = 37,4$ mm, är partikelhastigheten $U_p = 497$ m/s, stötvågens hastighet $U_s = 3123$ m/s och stöttrycket i barriären $P = 1,84$ GPa.



Figur 9: Avståndsberoendet hos stöttrycket i PMMA-barriären / *The dependence of the shock pressure on the distance along the PMMA-gap.*

4.2.2 Stigtidsanalys

Som framgår av analysen i avsnitt 4.2.1 är det önskvärt att ett mätsystem har så kort stigtid som möjligt, helst noll stigtid. Mätsystem har i verkligheten emellertid en inneboende stigtid. I vårt försök varierade signalernas stigtider mellan 30 och 50 ns med de flesta kring 30 ns, se tabell 3. Frågan är om vi kan minska den tiden på något sätt. Därför har en beräkning av den teoretiskt kortaste stigtiden utförts.

De faktorer som påverkar signalernas stigtider är följande:

- 1) elektronisk impedansanpassning i systemet (τ_1),
- 2) oscilloskopets stigtid (τ_2),
- 3) stötimpedansanpassning mellan EMV-givaren och PMMA-barriären (τ_3) och
- 4) krökningen av stötvågens front och dess position relativt EMV-givaren (τ_4).

Den slutligen stigtiden (τ) är:

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2 + \tau_4^2} \quad (9)$$

De respektive stigtiderna i vårt mätsystemet beräknas i Bilaga 2.

Enligt beräkningen är den totala stigtiden τ :

$$\tau = 19,5 \sim 28,1 \text{ ns.}$$

Detta är den teoretiskt kortaste stigtiden medan de verkliga stigtiderna i experimenten ligger mellan 30 och 50 ns, se tabell 3. Slutsatsen är att mätningarna och mätsystemet har fungerat utmärkt. En förkortning av stigtiden i vårt försök är praktiskt omöjlig, om vi inte kan använda en tunnare folie eller kortare aktiv längd på folien.

Som analysen i Bilaga 2 visar, är det EMV-givarens tjocklek som påverkar den totala stigtiden mest.

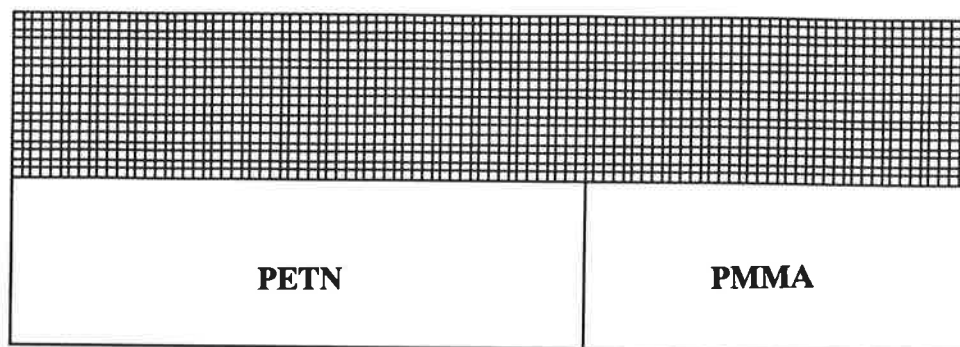
4.2.3 Datasimulering med DYNA2D

En datasimulering av kalibreringen av barriärprovet har utförts med programmet DYNA2D [11]. Huvudmålsättningen var att verifiera stöttryckamplitudens avståndsberoende i barriären.

Cellindelningen:

Cellindelningen visas i figur 10. Axiell symmetri användes, dvs både PETN

givarladdningen och PMMA-barriären anses vara cylindriska. Diametern på barriären och givarladdningen är 35 mm och längden på barriären och givarladdningen är 40 mm respektive 60 mm. Cellstorleken är 0,972x1 mm. Det innebär 18 celler i radiell riktning och 100 för hela längden.



Figur 10: Cellindelningen i datasimuleringen med programmet DYNA2D / *The element configuration in computer simulation using the DYNA2D program.*

En kapselinitiering av PETN simulerades genom att cellerna inom en cirkel runt axeln med diametern 7 mm initierades momentant vid tiden 0.

Tillståndsekvationen för givarladdningen:

Detonationsförloppet i PETN-givarladdningen simulerades med en ideal detonation och följande detonationsegenskaper:

Normal densitet = 1,5 g/cm³

Detonationshastighet = 7450 m/s

C-J tryck = 22 GPa /10/

Specifik detonationsenergi = 8,56 GJ/m³

En JWL-tillståndsekvation användes för detonationsprodukterna.

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (10)$$

Där: P = tryck (GPa)

$V = v/v_0$ = specifik volym hos produkterna/specifik volym hos oreagerat sprängämne

E = specifik inre energi (GJ/m³)

A, B, R_1, R_2 och ω är konstanter med värdena /10/:

$$A = 6,253 \text{ GPa}$$

$$B = 0,2329 \text{ GPa}$$

$$R_1 = 5,25$$

$$R_2 = 1,6$$

$$\omega = 0,28$$

Tillståndsekvationen för PMMA-barriären:

Grüneisens tillståndsekvation ekv 11 användes för PMMA-barriären.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (11)$$

Här: P = tryck (GPa)

$$\mu = (v_0/v) - 1$$

$$\rho = \text{densitet (kg/m}^3\text{)}$$

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

$$\gamma_0 = \text{Grüneisen gamma vid normaltillståndet} = 0,97 \text{ /6, 7/}$$

$$\rho_0 = \text{normal densitet} = 1185 \text{ kg/m}^3$$

C, S_1, S_2 och S_3 är polynom anpassningskonstanterna för Hugoniotkurvan i U_s -

Up planet /11/. I simuleringen använde vi en linjär anpassning och konstanterna

har värdena: $C = 2431 \text{ m/s}$, $S_1 = 1,392$ och $S_2 = S_3 = 0 \text{ /8/}$

a är en koefficient som beskriver Grüneisen gammas (γ_0) första grads

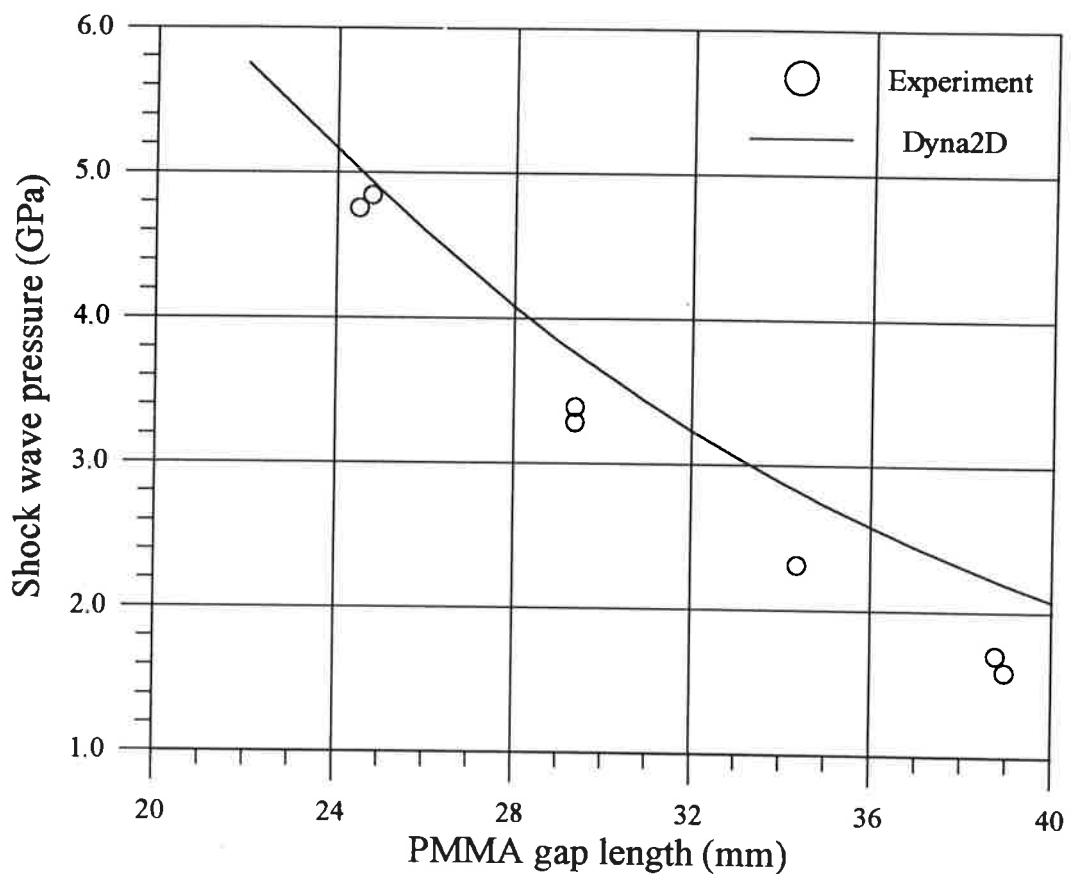
volymberoende /11/ och i simuleringen antas $a = 0$, dvs γ_0 är oberoende av volymen.

Hållfasthetsmodellen för PMMA:

En enkel elastisk-plastisk hållfasthetsmodell, typ #10 i DYNA2D /11/, användes för PMMA-barriären. Skjuvhållfastheten är 2,19 GPa och flytspänningen 0,17 GPa /6/.

Resultat:

Stöttrycket i olika punkter i barriären har beräknats och plottas i figur 11 mot avståndet från gränsytan mellan givarladdning och barriär.



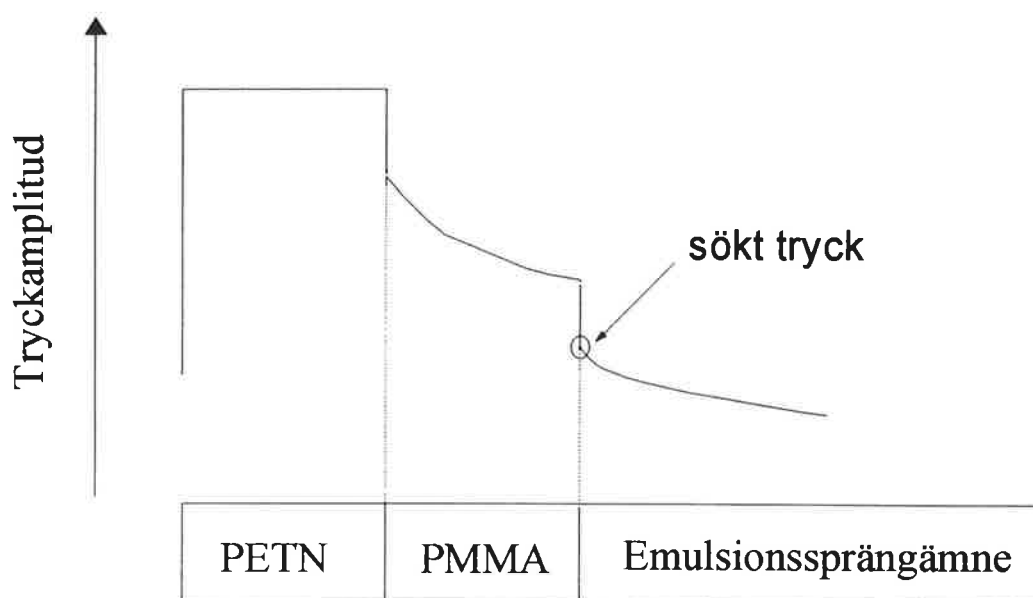
Figur 11: Simuleringens resultat: avståndsberoendet hos stöttrycket längs barriäraxeln, jämfört med de experimentella värdena / The results from the computer simulation: the dependence of the shock pressure on distance along the axis of the gap.

Som redovisas i figur 11 är lutningen på kurvan från simuleringen något mindre än den experimentella, vilket innebär att den beräknade tryckminskningen längs barriären är långsammare än i verkligheten. Detta resultat har dock observerats tidigare av andra [12]. Orsakerna kan vara bl a att man har betraktat Grüneisen gammas (γ_0) som volymoberoende och att man har använt en linjär anpassning för Hugoniot i U_s - U_p planet.

5 BERÄKNING AV DET MINSTA INITIERINGSTRYCKET - IMPEDANSANPASSNINGSMETODEN

När en stötvåg passerar en gränsyta mellan två material som har olika stötimpedans ($\rho_0 U_s$) uppstår det en tryckdiskontinuitet vid gränsytan. Med andra ord är tryckamplituden olika före och efter vågens passage.

För våra barriärprov och kalibrering av barriärprovet redovisar figur 12 stötvågsamplitudens förändring längs provet. En diskontinuitet existerar vid såväl gränsytan mellan givarladdning-barriär som gränsytan mellan barriär-mottagarladdning. Det kritiska tryck 1,84 GPa som beräknats hittills är den trycknivå som uppstår i PMMA-barriären innan gränsytan. Amplituden på det tryck som överförs till emulsionsmottagarladdningen är fortfarande okänt, men det kan beräknas.



Figur 12: Illustration av stötvågsamplitudens förändring längs provet i vårt barriärprov. Emulsionssprängämnet i figuren blir inte initierat av trycket från barriären /
Illustration of the change in the amplitude of the shock wave along the specimen in our Gap Test. The explosive in the figure is not initiated by the pressure from the gap.

5.1 Materialdata för beräkning

För att beräkna det verkliga överförda kritiska stöttrycket från barriären till mottagarladdningen finns impedansanpassningsmetoden. Beräkningen kräver Hugoniotdata för såväl barriärmaterialet som mottagarladdningen, dvs emulsionssprängämnet K1 i vårt fall. Om mottagarladdningens stötimpedans är mindre än barriärens måste man ytterligare ha kännedom om barriärens expansionsisentrop /4/.

I vårt försök har plexiglasbarriärens Hugoniot ekv 1 liksom emulsionsmatrisens Hugoniot, se ekv 12 nedan, bestämts experimentellt /8/. För matrisen gäller:

$$U_s = 2260 + 1,554U_p \quad (12)$$

Här är U_s och U_p stötvågens hastighet respektive partikelhastigheten i matrisen i m/s.

Sprängämnet kan betraktas som en porös matris och dess Hugoniot har beräknats ur matrisens Hugoniot med hjälp av Voskoboinikov's metod /13/:

$$U_s = 1788 + 1,503U_p \quad (13)$$

eller omskriven i P- U_p planet:

$$P = 2,08 \cdot 10^6 \cdot U_p + 1,75 \cdot 10^3 \cdot U_p^2 \quad (14)$$

Här är U_s och U_p stötvågens hastighet respektive partikelhastigheten i sprängämnet i m/s, P stöttryckets amplitud i Pa.

Voskoboinikov's metod förutsätter följande två ansatser:

- 1) Gasen i mikrosfärerna betraktas som ideal och dess tillstånd efter stöt kan beskrivas med ekv 15 nedan:

$$\rho_1/\rho_0 = (\gamma+1)/(\gamma-1) \quad (15)$$

Här är ρ_0 och ρ_1 gasens densitet före och efter stötvågspassagen. γ är den adiabatiska

koefficienten som har ett värde av 1,4 i vår beräkning.

2) Mekanisk jämvikt uppnås mellan matrisen och gasen, dvs trycknivån är samma i båda.

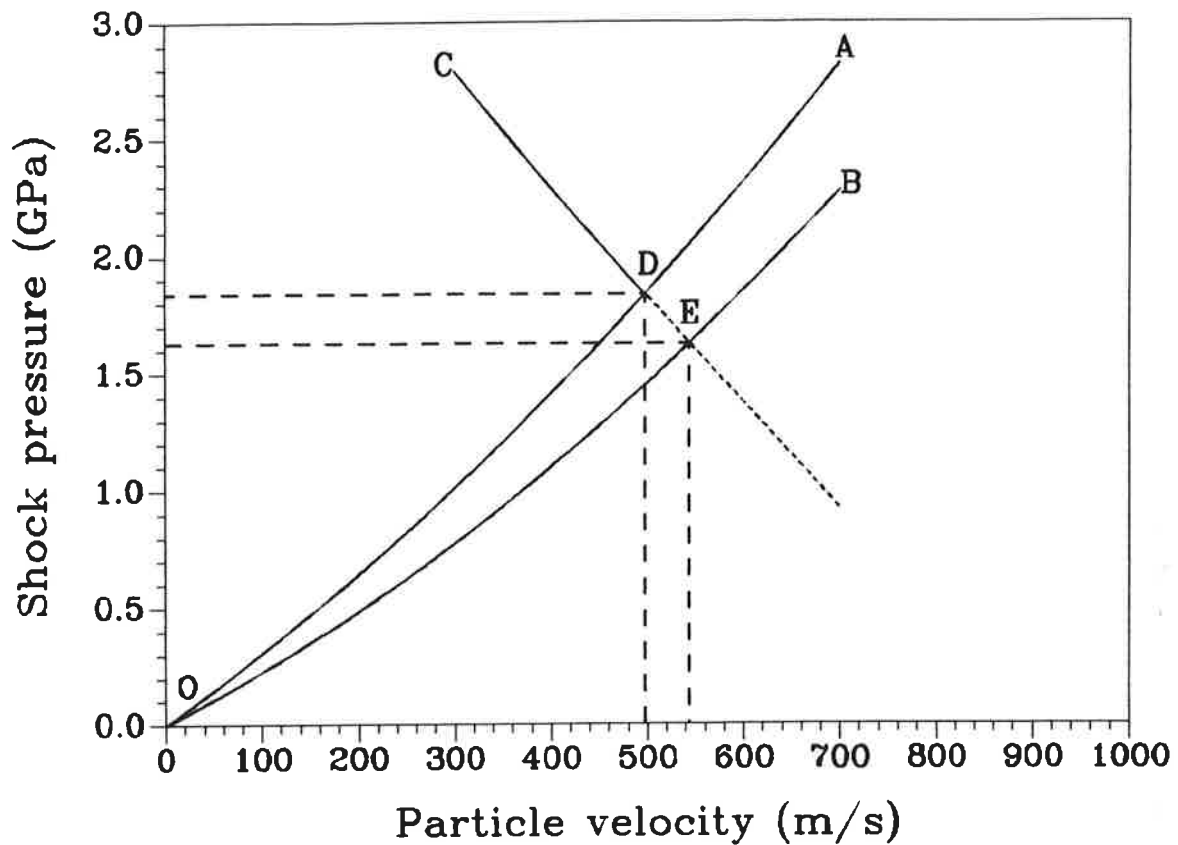
Reflektions-Hugoniotkurvan för PMMA-barriären vid den kritiska barriärlängden kan beräknas genom en spegling av Hugoniotkurvan för PMMA, ekv 3 vid den kritiska partikelhastigheten $U_p = 497$ m/s:

$$P = 2,88 \cdot 10^6 \cdot (994 - U_p) + 1,65 \cdot 10^3 \cdot (994 - U_p)^2 \quad (16)$$

5.2 Beräkningsutförande

Beräkningen har utförts grafiskt i figur 13 och metodens teoretiska grund finns i de flesta detonikböckerna, t ex /5/. Plexiglasets respektive sprängämnets Hugoniotkurvor syns i figuren som kurvorna ODA respektive OEB. Resultaten från barriärprovet och kalibreringen av barriärprovet presenteras som en punkt, punkten D, i figuren med $U_p = 497$ m/s och $P = 1,84$ GPa vid den kritiska barriärlängden. Det är vid den här punkten som reflektionen i gränsytan sker. Kurvan CD är då plexiglasets reflekterade Hugoniot, ekv 16. Punkten E representerar tillståndet i sprängämnet vid gränsytan efter stötvågens passage från barriären till sprängämnet.

Som visas i figuren är sprängämnets stötimpedans mindre än barriärens för att kurvan OEB:s sekant ligger under ODA:s. När stötvågen utbreder sig över gränsytan mellan barriär och sprängämne, reflekteras en expansionsvåg/dragvåg tillbaka in i barriären istället för en stötvåg. Det innebär att kurvan DE inte kan beskrivas med den reflekterade Hugoniot hos PMMA utan den är den isentrop för PMMA som passerar punkten D. Att bestämma den isentropen är relativt komplicerat. Därför användes en linjär approximation i vår analys, dvs vi antar att isentropen mellan punkterna D och E är linjär. Eftersom punkterna D och E ligger nära varandra, är inverkan av en sådan approximation på det slutliga resultatet mycket begränsad.



Kurvan ODA: Hugoniot för PMMA, ekv 3 / Curve ODA: Hugoniot of PMMA, eq. 3

Kurvan CD: Reflektions-Hugoniot för PMMA ekv 16, spegelbild av DA vid $U_p = 497$ m/s / Curve CD: Reflection Hugoniot of PMMA eq. 16, the image of curve DA at $U_p = 497$ m/s

Kurvan OEB: Hugoniot för emulsionssprängämne K1, ekv 14 / Curve OEB: Hugoniot of the emulsion explosive K1, eq. 14.

Linje DE: expansions isentrop för PMMA som passera punkten D, ekv 18 nedan / Line DE: expansion isentrope of PMMA passing the point D, eq. 18 below.

Figur 13: Grafiskt utförande av impedansanpassningsmetoden / Graphic application of the impedance-match method.

Lutningen på den linjära isentropen är densamma som på plexiglasets reflektions-Hugoniot CD vid punkten D enligt detonikteori /4/. Den kan beräknas ur ekv 16 och $U_p = 497$ m/s vid punkten D:

$$\left. \frac{dP}{dU_p} \right|_{U_p=497} = -4,52 \cdot 10^{-3} \quad (\text{GPa/m/s}) \quad (17)$$

Den approximativa isentropen blir då:

$$P = 4,09 - 4,52 \cdot 10^{-3} \cdot U_p \quad (18)$$

Här är P och U_p trycket (GPa) respektive partikelhastigheten (m/s) längs isentropen.

Skärningen mellan isentropen DE och sprängämnets Hugoniot OEB bestämmer punkten E och ger det överförda kritiska trycket på sprängämnesidan av barriären: 1,64 GPa. Den motsvarande kritiska partikelhastigheten blir då 544 m/s.

Dessa 1,64 GPa är det minsta initieringstrycket för vårt emulsionssprängämne K1 i laddningsdiametern 36 mm i PMMA-rör. Värdet är en sprängämnesegenskap, oberoende av antingen barriärmaterial eller typ av givarladdning. Det är emellertid beroende av laddningsdiameter och inneslutning.

6 SLUTSATSER OCH DISKUSSION

Slutsatser:

- Alla tre stegen i det traditionella barriärprovet har genomförts och det minsta initieringstrycket för emulsionssprängämne K1 i laddningsdiametern 36 mm har bestämts till 1,64 GPa.
- Mätningarna och mätsystemet har fungerat utmärkt. Kvaliteten och reproducerbarheten hos signalerna från kalibreringen av barriärprovet är mycket höga.
- Stigtidsanalysen har utförts för mätsystemet och den teoretiska stigtiden ($> 20 \sim 28$ ns) stämmer väl med verkliga mätvärden ($30 \sim 50$ ns), vilket ger resultaten trovärdighet.
- Kalibreringen av barriärprovet har simulerats med dataprogrammet DYNA2D. Resultaten stämmer någorlunda väl med de experimentella.

Diskussion:

Vi har följt alla tre stegen i barriärprovets metodik, dvs barriärprov, kalibrering och beräkning, för att bestämma det minsta initieringstrycket hos emulsionssprängämne K1 i laddningsdiametern 36 mm.

Vi skulle emellertid kunna ha ersatt kalibreringen och beräkningen med ett enklare förfaringssätt. Man kan nämligen mäta partikelhastigheten (U_p) med EMV-givare direkt i gränssytan mellan barriär och emulsionssprängämne i figur 12. Då får man partikelhastigheten på sprängämnets sida av gränssytan och det minsta initieringstrycket kan beräknas direkt med ekv 14.

I detta fall behöver man inte ens veta barriärmaterialets Hugoniot, dvs man kan i princip använda vilket material som helst. En nackdel med detta sätt är emellertid att varje gång mottagarladdningen ändras, t ex nytt sprängämne, ny inneslutning eller ny diameter, måste man utföra EMV-mätningar som kräver speciell utrustning och därför är

tidskrävande. En annan nackdel är att det är mycket svårare att göra EMV-mätningar i emulsionssprängämne vilket vi ännu inte kan göra med tillfredsställande reproducerbarhet /14/

Med den traditionella barriärprovsmetodiken, som vi använt, kalibreras stöttrycket i barriären en gång för alla för en given kombination av givarladdning och barriärmaterial. Om mottagarladdningen ändras behöver man bara göra några enkla barriärprov och ta reda på det kritiska barriärlängden. Sedan utnyttjar man den gamla kalibreringen och bestämmer det minsta initieringstrycket för den nya mottagarladdningen.

Eftersom vår forskning har som ett långsiktigt mål att undersöka många olika sprängämnestyper och laddningsdiameter, valdes den generellare metodiken.

Man måste dock känna till mottagarladdningens Hugoniot i båda metoderna.

ERKÄNNANDEN

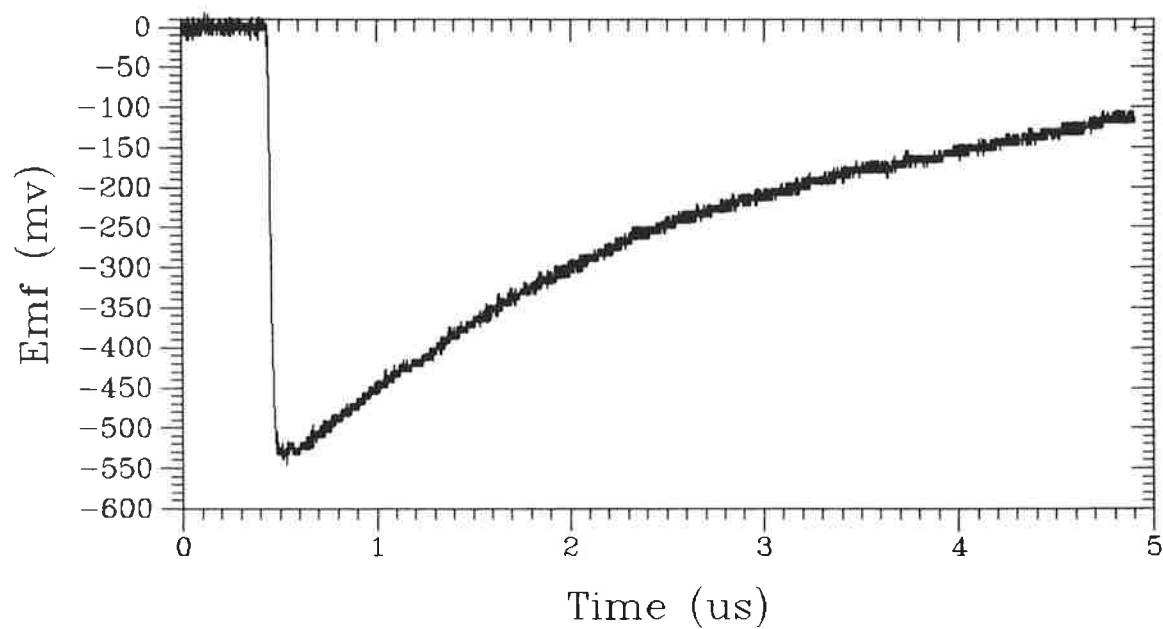
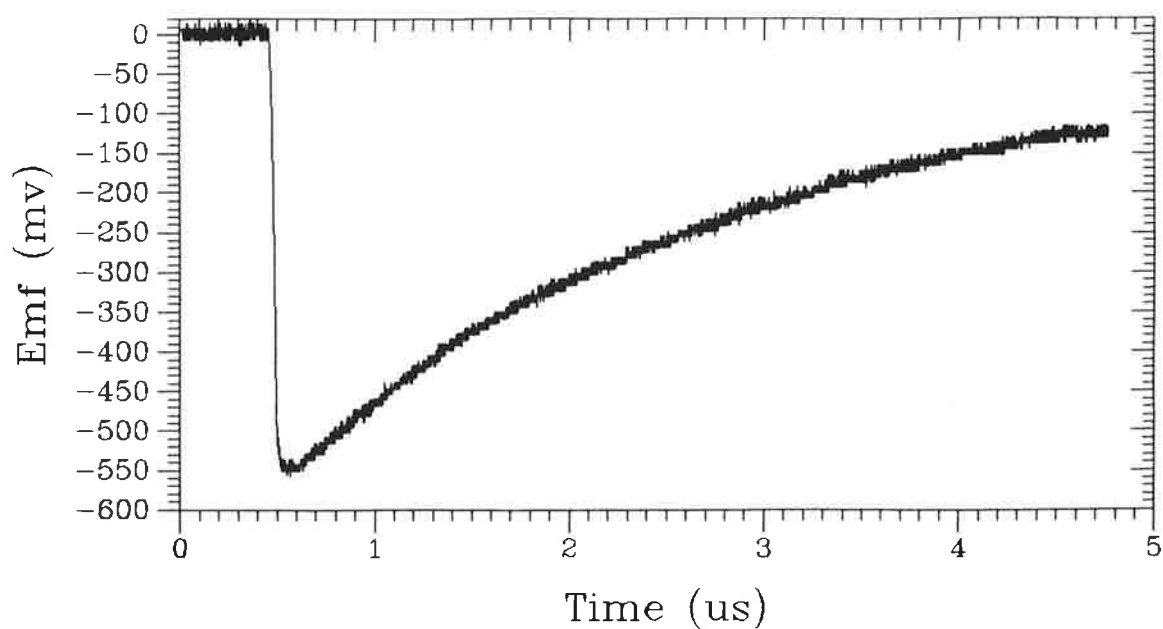
Arbetet utfördes som ett delprojekt inom K1 under SveDeFo:s ramprogram 1990-1993, "Tillståndsekvationer och brinnmodeller för kommersiella sprängämnen" med Algot Persson som projektledare. Huvudansvarig för försöken och rapporteringen har varit Shulin Nie. DYNA2D beräkningen har utförts av Junhua Deng. Ulf Nyberg har varit skjutledare för barriärprovets försök på Grindsjön. Sprängämnet K1 tillverkades och laddades i rör av Kimit AB.

REFERENSER

1. Ouchterlony F: "Underlag till ramprogram för kollektiv forskning inom detonik och bergbrytningsteknik, SveDeFo 1990-1993", SveDeFo rapport DS 1990:5.
2. Almström H: Kurs i detonik, 1993.
3. Nyberg U et al: "Mätning av detonationshastighet och krökningsfronten i samband med brinnmodellsutveckling för emulsionssprängämne K1" SveBeFo rapport 6, 1994.
4. Zerilli F J (Editor): "Notes from Lectures on Detonation Physics", Naval Surface Weapons Center, Silver Spring, Maryland 20910, 1981.
5. Fedoroff B T and Sheffield O E: "Encyclopedia of Explosives and Related Items", PATR 2700, Vol. 6. Picatinny Arsenal. Dover, New Jersey, USA, 1974.
6. Edwards D J Erkman J O and Jacobs S J: "The Electromagnetic Velocity Gage and Applications to the Measurement of Particle Velocity in PMMA", NOLTR 70-70, 1970.
7. Kinslow R: "High-Velocity Impact Phenomena", Academic Press, New York and London, 1970.
8. Nyberg U och Deng J: "Hugoniotbestämning på ett emulsionssprängämnes matris", SveBeFo rapport 11, 1994.
9. Dixon W J and Massey F J: "Introduction to Statistical Analysis". McGraw-Hill, 3rd ed., 1969.
10. Dobratz B M: "Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants", Lawrence Livermore Laboratory, University of California, UCRL-51319, 1974.
11. Deng J. "DYNA2D manual", SveDeFo rapport DU 1991:9.

12. Erkman J O, Edwards A R, Clairmont Jr and Price D: "Calibration of the NOL Large Scale Gap Test; Hugoniot Data for Polymethyl Methacrylate", Naval Ordnance Laboratory, NOLTR 73-15, 1973.
13. Voskoboinikov I M, Afanasenkov A N och Bogomolov V M: "Generalized Shock Adiat for Organic Liquids", Combustion , Explosion and Shock Waves, 3, 359-364, 1967.
14. Persson A, Deng J, Nyberg U och Nie S: "Partikelhastighetsmätning i detonerande emulsionssprängämne". SveBeFo rapport 9, 1994.

BILAGA 1: REGISTRERINGAR FRÅN KALIBRERING AV BARRIÄRPROVET

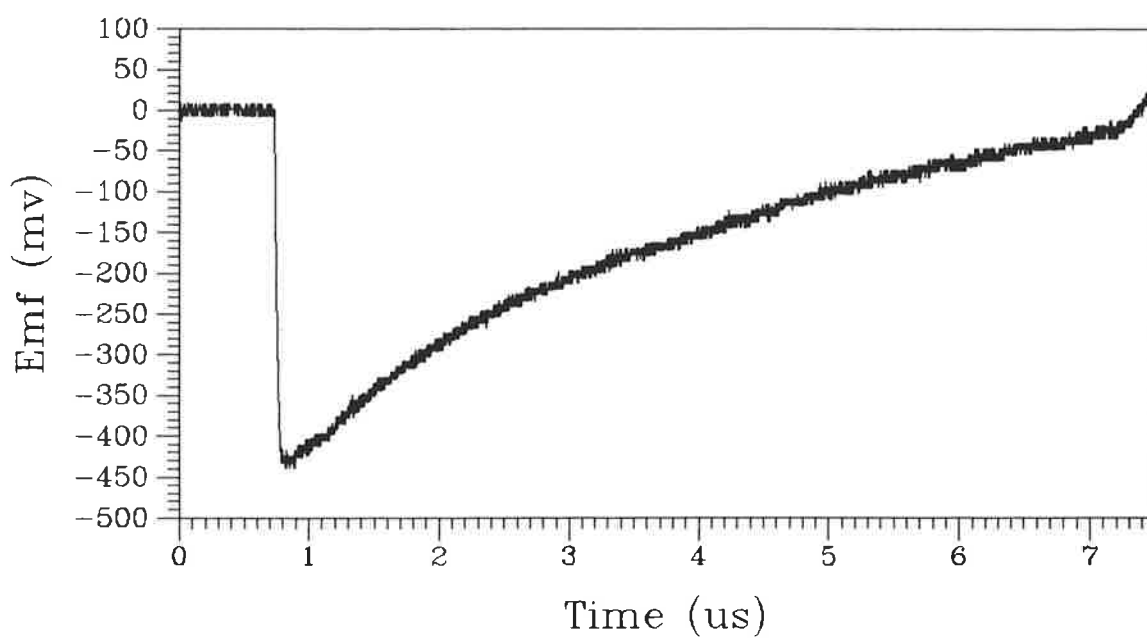
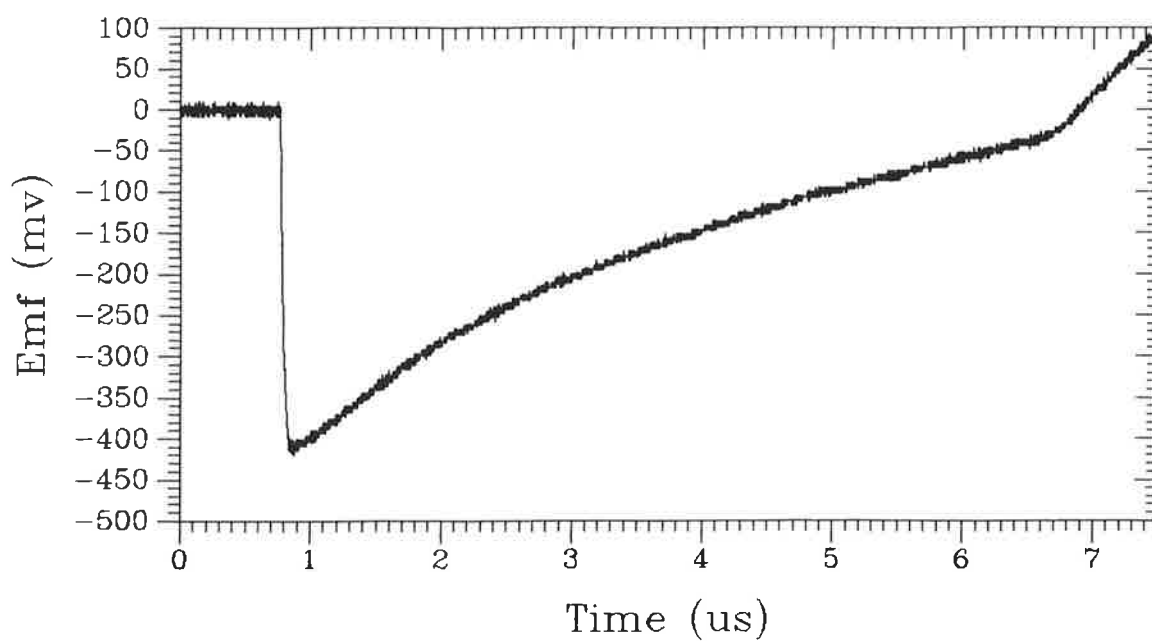


Övre: Skott nr 1, barriärlängden = 24,8 mm, extrapolerad EMK = 575 mV

/ Upper: Shot No.1, gap length = 24.8 mm, extrapolated Emf = 575 mV.

Nedre: Skott nr 2, barriärlängden = 24,5 mm, extrapolerad EMK = 558 mV

/ Lower: Shot No.2, gap length = 24.5 mm, extrapolated Emf = 558 mV.

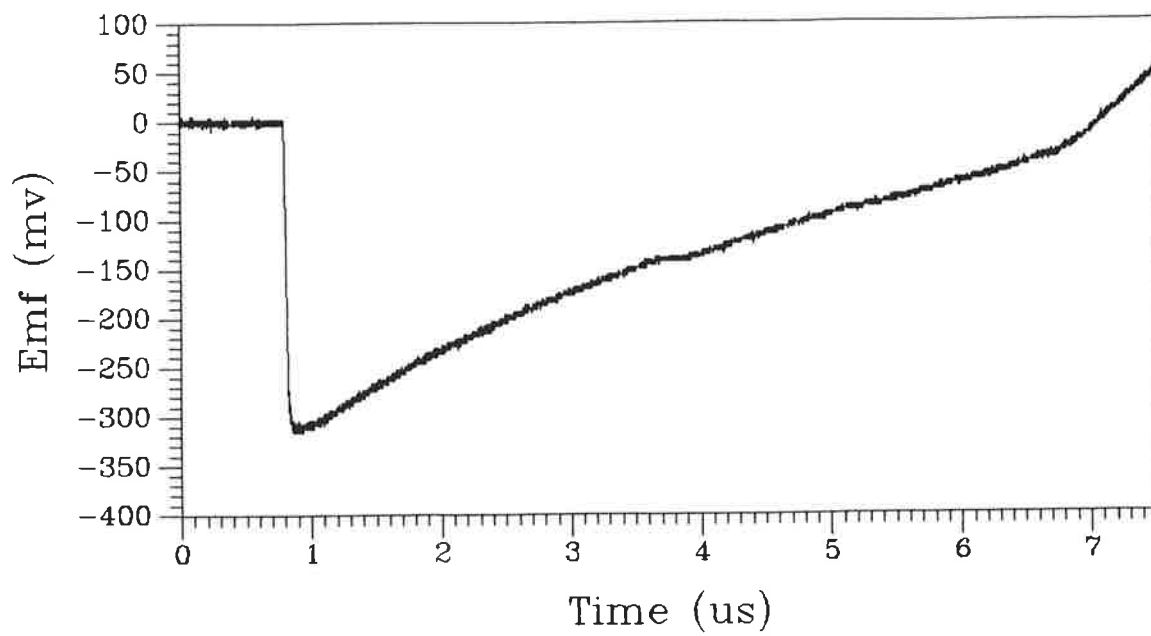


Övre: Skott nr 3, barriärlängden = 29,4 mm, extrapolerad EMK = 425 mV

/ Upper: Shot No.3, gap length = 29.4 mm, extrapolated Emf = 425 mV.

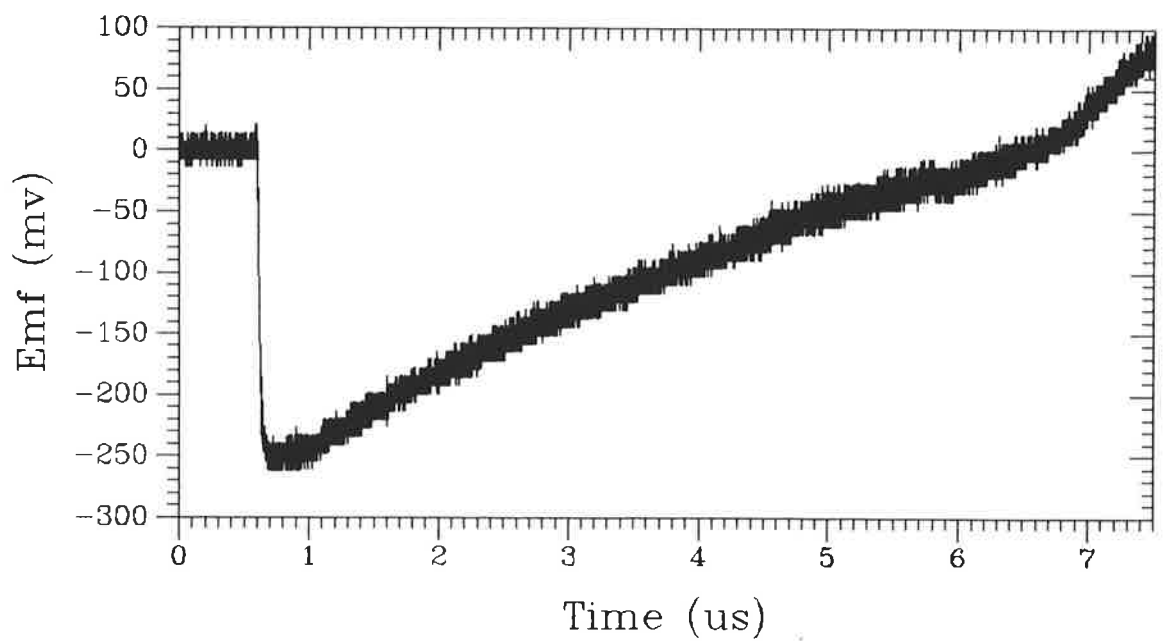
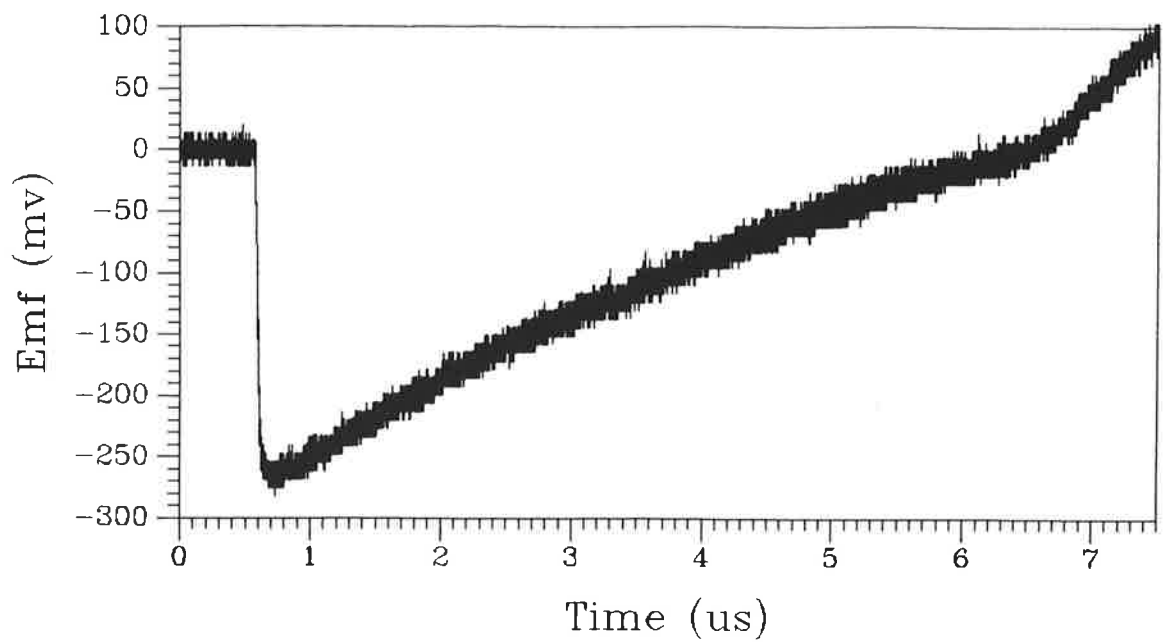
Nedre: Skott nr 4, barriärlängden = 29,4 mm, extrapolerad EMK = 439 mV

/ Lower: Shot No.4, gap length = 29.4 mm, extrapolated Emf = 439 mV.



Skott nr 5, barriärlängden = 34,4 mm, extrapolerad EMK = 325 mV.

/ Shot No.3, gap length = 34.4 mm, extrapolated Emf = 325 mV.



Övre: Skott nr 7, barriärlängden = 38,8 mm, extrapolerad EMK = 271 mV

/ Upper: Shot No.7, gap length = 38.8 mm, extrapolated Emf = 271 mV.

Nedre: Skott nr 8, barriärlängden = 39,0 mm, extrapolerad EMK = 256 mV

/ Lower: Shot No.8 gap length = 39.0 mm, extrapolated Emf = 256 mV.

BILAGA 2: STIGTIDSANALYSEN FÖR MÄTSYSTEMET

Som framgår av analysen i avsnitt 4.2.1 är det önskvärt att ett mätsystem har så kort stigtid som möjligt, helst noll stigtid. Mätsystem har i verkligheten emellertid en inneboende stigtid. I vårt försök varierade signalernas stigtider mellan 30 och 50 ns med de flesta kring 30 ns, se tabell 3. Frågan är om vi kan minska den tiden på något sätt. Därför har en beräkning av den teoretiskt kortaste stigtiden utförts.

De faktorer som påverkar signalernas stigtider är följande:

- 1) elektronisk impedansanpassning i systemet (τ_1),
- 2) oscilloskopets stigtid (τ_2),
- 3) stötimpedansanpassning mellan EMV-givaren och PMMA-barriären (τ_3) och
- 4) krökningen av stötvågens front och dess position relativt EMV-givaren (τ_4).

Den slutligen stigtiden (τ) är:

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2 + \tau_4^2} \quad (\text{B1})$$

De respektive stigtiderna i vårt mätsystemet beräknas nedan.

τ_1 och τ_2 : I vårt mätsystem är alla instrument och kablar impedansanpassade till 50 Ω och oscilloskopet är ett LeCroy 7200 som har en stigtid på 0,9 ns. Därför har vi:

$$\tau_1 = 0 \text{ och } \tau_2 = 0,9 \text{ ns}$$

τ_3 : τ_3 kan uppskattas som den tid det tar att accelerera EMV-givaren till 90% av omgivningshastigheten. Den kan beräknas med en formel som Edwards m fl [6] utvecklade genom sk linjär approximation.

$$\tau_3 = (4 \sim 6) \cdot \delta / U_{\text{sal}} \quad (\text{B2})$$

Här: δ = tjockleken på aluminiumfolien som EMV-givaren gjorts av

U_{sal} = stötvågens hastighet i aluminium, uppskattas till 6000 m/s i genomsnitt.

Ekv B2 innebär att stötvågen hinner reflekteras fram och tillbaka 2 till 3 gånger i EMV-givaren innan givaren får en hastighet som är 90% av hastigheten i den omgivande barriären.

Vår aluminiumfolie som EMV-givaren tillverkades av har en tjocklek på 25 μm . Därför har vi:

$$\tau_3 = 16,7 \sim 25,0 \text{ ns}$$

τ_4 : Enligt stigtidsdefinitionen är τ_4 tidsskillnaden mellan två tidpunkter när 10% respektive 90% av EMV-givarens aktiva längd träffas av stötvågen. Att beräkna τ_4 noggrant är komplicerat och en del mätningar krävs dessutom. Men med hjälp av några lämpliga ansatser kan man förenkla beräkningen och uppskatta τ_4 .

Ansats 1: τ_4 kan uppskattas som den tid det tar för stötvågen att träffa och rörelsesätta 90% av EMV-givarens aktiva längd (L).

Detta ansats gör vårt beräknade τ_4 något längre än i verkligheten.

Ansats 2: Under tiden τ_4 kan stötvågens hastighet betraktas som konstant, dvs stötvågen träffar 90% av givarens aktiva längd med samma hastighet.

Stötvågens hastighet är, som partikelhastigheten (U_p) och stöttrycket (P), avståndsberoende i barriären. Dess beroende kan härledas genom ekv 1 och 7:

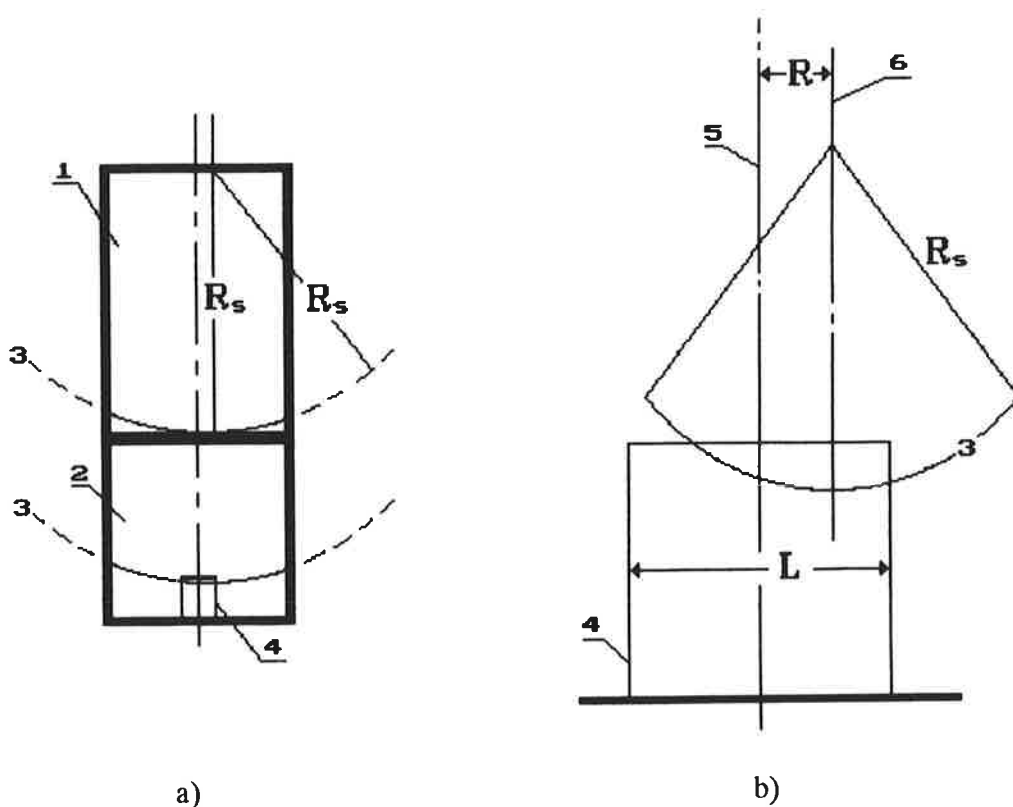
$$U_s = 2431 + 6166 \cdot e^{-0,0585x} \quad (\text{B3})$$

Här är x avståndet i mm mellan EMV-givaren och gränssytan mellan givarladdning och barriär. U_s är stötvågens hastighet i m/s.

I vårt försök varierades x från 24,5 till 39,0 mm. Motsvarande U_s enligt ekv B3 varierade mellan 4195 och 3267 m/s i hela barriären.

Eftersom τ_4 är mycket kort, på nanosekund nivå, har vi anledning att betrakta U_s som en konstant under den tiden.

Situationen där en krökt stötvågsfront träffar EMV-givaren illustrerades i figur B1 b. Fronten har en krökningsradie R_s och dess krökningscentrum har parallellförflyttats R i förhållande till barriärens axel. Baserat på ansatserna 1 och 2 kan τ_4 beräknas generellt med ekv B4, B5 eller B6 beroende på storleken på R .



- 1: givarladdningen / the donor charge
- 2: PMMA-barriären / the PMMA-gap
- 3: den krökta stötvågens front / the curved shock wave front
- 4: EMV-givaren / the EMV-gage
- 5: barriärens axel / the axis of the gap
- 6: stötvågens krökningscentrum / the center of curvature of the shock wave front

Figur B1 a): Stötvågens fortplantning i givarladdningen och i barriären / Propagation of the shock wave in the donor charge and the gap.

B1 b): Stötvågens ankomst till EMV-givaren / The arrival of the shock wave at the EMV-gage.

$$\tau_4 = \frac{R_s}{U_s} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{0,45L}{R_s} \right)^2} \right] \quad (0 \leq R \leq 0,05L) \quad (B4)$$

$$\tau_4 = \frac{R_s}{U_s} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{0,4L + R}{R_s} \right)^2} \right] \quad (0,05L \leq R \leq 0,5L) \quad (B5)$$

$$\tau_4 = \frac{R_s}{U_s} + \frac{0,9L(R - 0,5L)}{U_s R_s} - \frac{1}{U_s} \sqrt{0,9^2 L^2 \left[\left(\frac{R - 0,5L}{R_s} \right)^2 - 1 \right] + R_s^2} \quad (0,5L \leq R) \quad (B6)$$

Här: R_s = stötvågsfrontens krökningsradie (m)

U_s = stötvågens hastighet (m/s)

L = EMV-givarens aktiva längd (m)

R = parallellförflyttning av stötvågens krökningscentrum från barriärens axel (m)

Eftersom det saknas mätdata på R och R_s , krävs ytterligare ansatser för att fortsätta beräkningen.

Ansats 3: Initieringen av givarladdningen har varit axiellt perfekt, dvs $R = 0$ vid initieringen.

Ansats 4: När detonationsfronten utbreder sig genom givarladdningen efter initiering, planar fronten ut. Krökningscentrum förflyttar sig inte utan ligger fast på initieringspunkten. Med andra ord är krökningsradien lika med avståndet mellan fronten och initieringspunkten. Då fronten når gränsytan mellan givarladdning och barriär, är R_s lika med laddningslängden: $R_s = 60$ mm, se figur B1 a.

Denna ansats är inte orimlig enligt /4/.

Ansats 5: När stötfrenten når PMMA-barriären, utbreder den sig parallellt i barriären, dvs R_s är konstant, se figur B1 a. När fronten träffar EMV-givaren, har vi fortfarande: $R = 0$ och $R_s = 60$ mm.

Ansatzerna 3, 4 och 5 gör vårt beräknade τ_4 något kortare än i verkligheten.

Nu kan värdena $R = 0$, $R_s = 60$ mm, $L = 5$ mm och $U_s = 4195 \sim 3267$ m/s sättas in i ekv B4 och vi erhåller:

$$\tau_4 = 10,1 \sim 12,9 \text{ ns}$$

Total stigtid τ : Sätt in $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = 0,9$ ns, $\tau_3 = 16,7 \sim 25,0$ ns och $\tau_4 = 10,1 \sim 12,9$ ns i ekv B1 så erhåller vi:

$$\tau = 19,5 \sim 28,1 \text{ ns.}$$

Detta är den teoretiskt kortaste stigtiden.