

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH
SveBeFo Rapport 22

**TILLSTÅNDESEKVATIONER OCH
BRINNMODELLER FÖR
EMULSIONSSPRÄNGÄMNER**

**Equations of State and Burn Equations
for Emulsion Explosives**

Finn Ouchterlony, Algot Persson, SveBeFo

FÖRORD

SveBeFo:s forskningsprogram spänner över bergbyggandets olika stadier, från undermarksplanering och förundersökningar till berguttag, 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 är en huvuduppgift att öka kunskaperna om sprängämnens verknings sätt med målet att bättre utnyttja den tillgängliga energin i samband med bergbrytning. För att kunna göra detta behöver vi bl.a. kunna beskriva detonationsförloppet i civila sprängämnen i sådan detalj att växelverkan mellan det detonerande sprängämnet och berget kan återges av våra modeller oberoende av håldiameter, bergegenskaper osv.

I civila sprängämnen är detonationen oftast icke-ideal. Detta betyder att omsättningen till gasformiga reaktionsprodukter bakom detonationsfronten tar så lång tid att en del av den sker som en efterförbränning vilken inte längre kan påverka fronten. Detonationshastighet och -tryck blir lägre än för en ideal detonation och beroendet av laddningsdiametern och bergets genskaper blir kraftigare.

För att beskriva detta väl krävs att vi har tillgång till tillståndsekvationer med materialdata för sprängämnet och de resulterande spränggaserna samt en brinnmodell som beskriver hastigheten med vilken sprängämnet omsätts.

Detonikforskningen innefattar främst experiment för att ta fram dessa data men också viss teoriutveckling. Dessutom studeras inom detoniken sprängämnens känslighet för stöttrycket från närliggande laddningar och hur detta påverkar deras förmåga att detonera. Vidare pågår sedan en tid utvecklingen av en givare som kan mäta trycket i botten av ett fulladdat borrhål när laddningen detonerar.

I föreliggande rapport avrapporteras SveBeFo projekt 181 i vilket arbetet främst inriktats på att ta fram en brinnmodell i form av en brinnekvation med materialdata för civila sprängämnen av emulsionstyp. Arbetet påbörjades inom SveDeFo:s tidigare ramprogram 1990-93 med Algot Persson som projektledare. En referensgrupp bestående av representanter för Nitro Nobel, Kimit och FOA har följt forskningsarbetet och givit värdefulla bidrag till det.

Stockholm i maj 1996

Finn Ouchterlony

Sammanfattning

Denna rapport innehåller en beskrivning av arbetet inom och resultaten från ett projekt som inleddes som projekt K1 i SveDeFo:s ramprogram 1990-93 under namnet "Tillståndsekvationer och brinnmodeller för kommersiella sprängämnen". Projektet har nu fullföljts i och med att sådana ekvationer och materialdata har tagits fram för ett laboratorieemulsionssprängämne baserat på ammoniumnitrat.

Arbetet har omfattat litteraturstudier, implementering av det hydrodynamiska FEM-programmet Dyna2D, beräkningar och försök. Detaljerna i arbetet beskrivs i ett antal delrapporter. I denna rapport görs en sammanfattande beskrivning samt diskuteras giltighet och nytta hos resultaten liksom förslag till fortsatt arbete.

Nödvändiga sprängämnesdata bestäms genom beräkningar och försök. Två typer av försök är nödvändiga, Hugoniotförsök på emulsionssprängämnets matris och mätning av detonationshastigheten och detonationsfrontens utseende som funktion av laddningsdiametern. I båda fallen utnyttjas Dyna2D för utvärderingen. Övriga tillståndsdataberäknas eller tas ur litteraturen. Ytterligare försökstyper har också utprovats, bl.a partikelhastighetsmätningar med elektromagnetiska givare.

Metoderna att bestämma tillståndsekvationer och brinnmodeller för civila sprängämnen kan i nuvarande skick tas över av SveBeFo:s huvudmän och därigenom komma bergbrytningsbranschen till nytta. Fortsatt arbetet på varianter av ursprungsreceptet har vidtagits med förbättrade metoder i syfte att på sikt medverka till sprängämnen med önskade verkansegenskaper. Nyttan av resultaten diskuteras ingående i rapportens sista del, avsnitt 4.

Nyckelord: sprängämne, emulsion, detonik, icke-ideal detonation, tillståndsekvation, brinnmodell, försök, Hugoniot, detonationshastighet, detonationsfont, FEM-beräkning, Dyna2D.

Summary

This report contains a description of the work and of the results obtained within a project which started as project K1 within SveDeFo's research program 1990-93 under the title: "Equations of state (EOS) and burn models for commercial explosives". The project has now been completed in that the desired data for an ammonium nitrate based laboratory emulsion have been obtained.

The work has contained literature studies, an implementation of the hydrodynamic FEM code Dyna2D for simulation of dynamic processes, computations and experiments. The details of the work are described in a set of available auxiliary reports. In this report the work is summarized and the validity and the usefulness of the results are also discussed.

The necessary data have been obtained through both computations and experiments. Two types of experiments are necessary to make, Hugoniot determinations on the emulsion matrix and the measurement of VOD and detonation front curvature as a function of charge diameter. In both cases Dyna2D is an integral part of the evaluation. The remaining EOS data has either been computed or obtained from the literature.

The methods used to determine EOS and burn equation data for civil explosives can be taken over by SveBeFo's industry principals in their present form and thus become of use for the rock extraction industry. SveBeFo has continued the work to obtain similar data, with improved methods, for different variations to the basic lab emulsion recipe. The long range goal of this work is to contribute to more effective explosives. The practical usefulness of the results is discussed in depth in the last part of the report, section 4.

Key words: explosives, emulsion, detonics, non-ideal detonation, equations of state, burn model, experiments, Hugoniot, VOD, detonation front, FEM-computations, Dyna2D.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sida

1	INLEDNING	1
1.1	Projektorganisation och målsättning	1
1.2	Emulsionssprängämne K1 och nödvändiga data för en brinnmodell	2
2	PROJEKTETS GENOMFÖRANDE	6
2.1	Litteraturstudier	6
2.2	Hydrodynamiskt finitelementprogram, Dyna2D	8
2.3	Mätning av detonationshastigheten	9
2.4	Mätning av detonationsfrontens krökningsradie	10
2.5	Mätning av minsta initieringstryck i sprängämnet	12
2.6	Partikelhastighetsmätningar i detonerande sprängämne	14
2.7	Mätning av emulsionsmatrisens Hugoniot	16
2.8	Bestämning av brinnmodellparametrar för emulsion K1	18
3	DISKUSSION AV RESULTATEN	26
3.1	Diskussion av giltighet och antaganden	26
3.2	Förbättring av mätmetoder	30
3.3	Fortsatt arbete	30
4	NYTTAN AV RESULTATEN	32
4.1	Om brinnmodellers användning och begränsningar	32
4.2	Vad krävs för att ta fram en brinnmodell	34
5	ERKÄNNANDEN	36
6	REFERENSER	37

1 INLEDNING

1.1 Projektorganisation och målsättning

Projekt "Tillståndsekvationer och brinnmodeller för kommersiella sprängämnen" startade som projekt K1 inom SveDeFo:s ramprogram 1990-93 /1/ med Algot Persson som projektledare. Vid tidpunkten för sammanslagningen mellan SveDeFo och BeFo sommaren 1993 var arbetet ännu inte slutfört och det drevs vidare inom den nya organisationen som SveBeFo projekt nr 181, "Brinnmodelldata för kommersiella sprängämnen" /2/ med Finn Ouchterlony som projektledare.

Följande SveBeFo-personal har arbetat inom projektet; Junhua Deng, Stefan (Shulin) Nie och Ulf Nyberg. En del av projektarbetet har gjorts av de direkt engagerade huvudmännen Kimit AB och Nitro Nobel AB. Huvuddelen av det experimentella arbetet har utförts i SveBeFo:s sprängtank som varit stationerad hos FOA på Ursvik.

Projektgruppen har rapporterat till referensgruppen för detonik. Först var Algot Persson ordförande. Sedan har Stefan Lamnevik från FOA varit det och Finn Ouchterlony föredragande. I referensgruppen har förutom projektpersonalen också ingått

Henrik Almström	FOA
Björn Engsbråten	Nitro Nobel AB
Lars Granlund	Nitro Nobel AB
Peter Stenberg	Kimit AB.

Referensgruppen har sammanträtt 2-3 ggr per år och i regel strax innan SveBeFo:s programstyrelsemöten för att ge en aktuell projektredovisning till dessa.

Täta kontakter har däremellan hållits med främst Henrik Almström angående detonationsteori, mätteknik och försöksanalys. Han har dessutom lett en doktorandkurs i detonationsteori i vilken projektgruppens medlemmar deltagit. Samarbetet med FOA har gett en kompetenshöjning som har varit ytterligt värdefull för projektet.

Projektets ursprungliga målsättning var att:

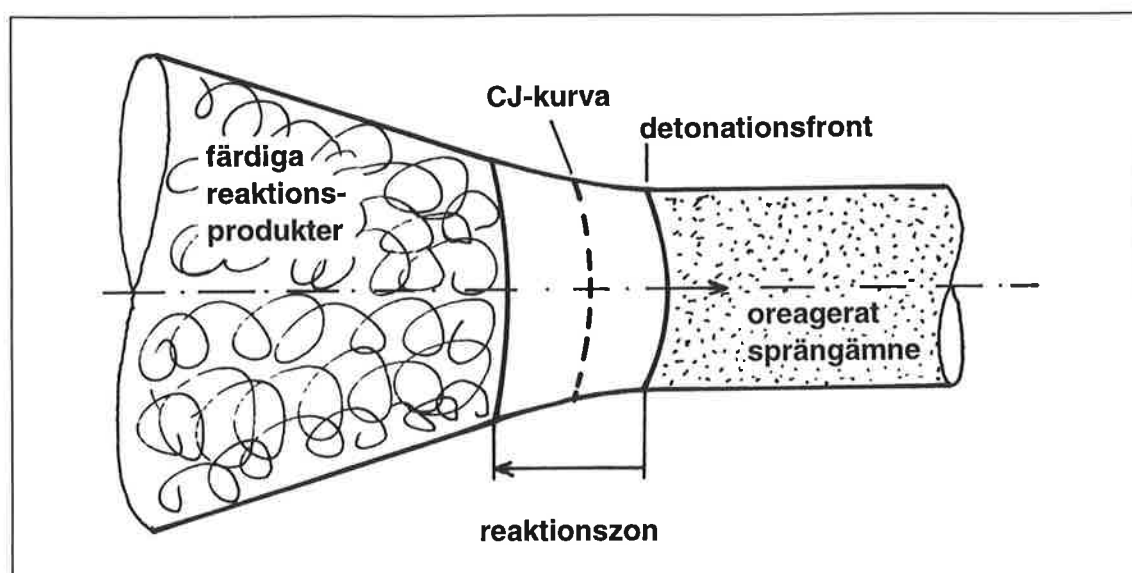
- härleda en brinnmodell för sprängämnets omsättning i reaktionszonen och bestämma modellparametrarna genom försök med något emulsionssprängämne,
- bestämma en tillståndsekvation för reaktionsprodukterna
- använda dessa samband vid datorsimulering av detonationsförloppet.

Bakgrunden till denna målsättning framgår av avsnitt 1.2 nedan.

1.2 Emulsionssprängämne K1 och nödvändiga data för en brinnmodell

I ideala sprängämnen sker omsättningen från explosivämne till reaktionsprodukter inom området mellan den inerta stötfronten (den s.k. von Neumann-spiken) och Chapman-Jouguet-planet (CJ-planet) vilket alltså definierar reaktionszonen. Vid CJ-planet gäller att dess hastighet är lika med summan av partikelhastigheten och den lokala ljudhastigheten vid planet, dvs att förhållandena är soniska. För många militära sprängämnen, som utgörs av enstaka explosivföreningar, är reaktionszonens tjocklek av storleksordningen bråkdelar av mm. De betar sig då idealt i de cm-dimensioner som de normalt används.

Sprängämnen för civilt bruk är oftast blandningar av syregivare och bränslen m.fl. ingredienser. Reaktionen tar längre tid och de används ofta i dimensioner nära den kritiska diametern. Detonationen blir icke-ideal då en del av reaktionen fortgår även bakom CJ-planet, dvs som en efterförbränning som inte längre påverkar detonationsfronten. Se Figur 1. Detonationshastighet och -tryck blir lägre än för ett idealt sprängämne och andra karakteristiska storheter som detonationsfrontens krökningsradie mm kommer att uppvisa ett kraftigare beroende av laddningsdiameter och bergegenskaper.



Figur 1: Definition av icke-ideal detonation.

Det räcker då inte med sprängämnets egenskaper före detonationen och spränggasernas egenskaper efteråt för att ge en fullständig beskrivning av ett detonations- och sprängningsförlopp. Man måste också ha en modell, i form av en eller flera ekvationer med tillhörande materialparametrar, som beskriver sprängämnets omsättning från fast oreagerat till huvudsakligen gasformiga produkter med högt tryck och hög temperatur.

Denna uppsättning ekvationer med tillhörande parametrar kallas här en brinnmodell. Parametervärdena är olika för olika sprängämnen och måste bestämmas experimentellt.

AN-baserade sprängämnen som ANFO är icke-ideala blandsprängämnen som sedan länge använts för civilt bruk. Orsaken till att intresset för brinnmodeller ändå vaknat relativt sent beror på emulsionssprängämnenas tillkomst /3/. Man kunde helt enkelt inte längre med tillgänglig teori få en tillräckligt god och detaljerad beskrivning av deras verkan. Vägen dit går via brinnmodeller och i detta arbete har ICI /4/ varit föregångsmän.

Det sprängämne som valdes inom projektet var ett s.k. typiskt laboratorieemulsions-sprängämne baserat på ammoniumnitrat (AN). Det kallas nedan emulsion K1 och tillverkades av Kimit AB. Receptet anger matrisens viktsandelar av totalen till ca 77,5% AN, 14,7% vatten, 3,9% olja och 0,7% av emulgeringsmedlet sorbitolmonooleat vilket ger en densitet om ca 1380 kg/m³.

Till detta kommer ca 3,1% mikrosfärer av typ B23/500 från 3M vilket ger sprängämnet en slutdensitet mellan 1160 och 1170 kg/m³.

Emulsion K1 blandades i satser om 1,5 kg med samma varvtal och blandningssätt varje gång. Noggrannheten i invägda ingredienser var 0,1 g. En särskild oljefas användes vars droppstorlek mättes. Mikrosfärerna har tagits från samma förpackning som skakats om varje gång.

Den ursprungliga aktivitetsplanen för projekt K1 /1/ innehöll följande sju delar:

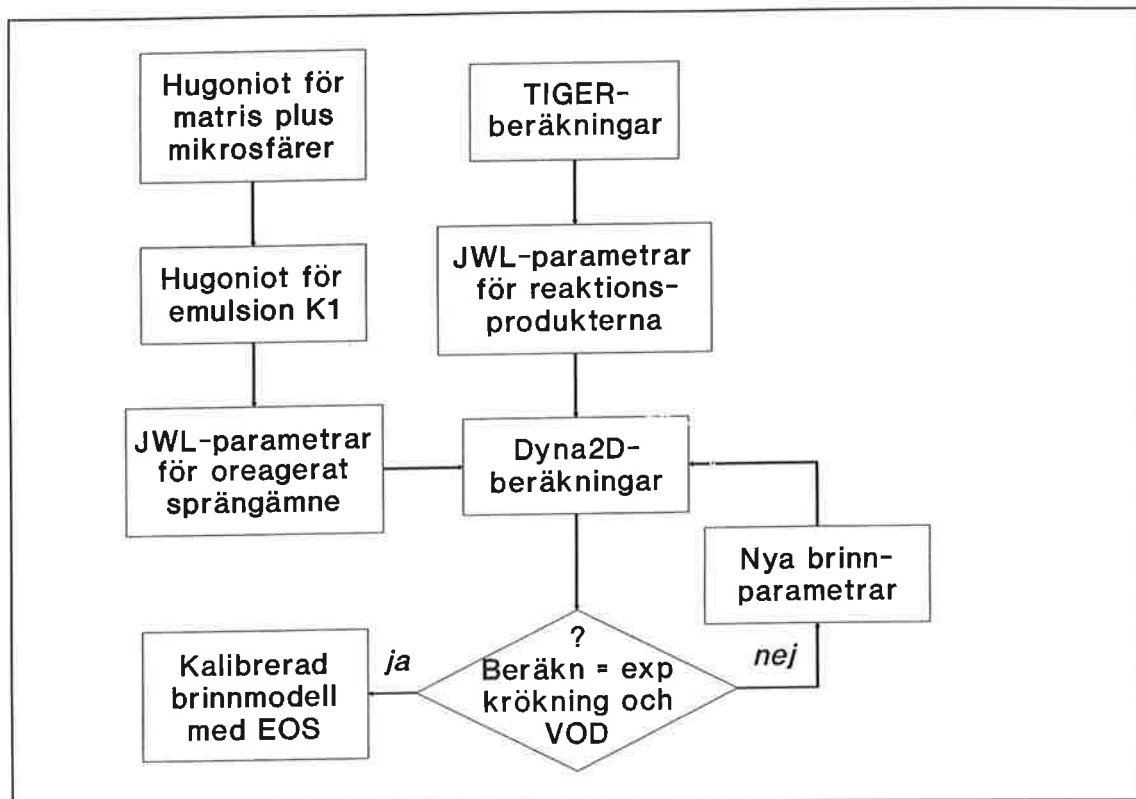
- 1 Litteraturstudier av brinnmodeller och tillståndsekvationer.
- 2 Bestämning av initieringskänsligheten hos några emulsionssprängämnen.
- 3 Bestämning av detonationshastighetens diameterberoende och kritisk diameter för några emulsionssprängämnen.
- 4 Bestämning av detonationszonens krökning.
- 5 Bestämning av det icke detonerande sprängämnets Hugoniot och materialrörelsen bakom detonationsfronten.
- 6 Anskaffning av utrustning och igångkörning av Dyna2D programmet.
- 7 Bestämning av brinnmodellparametrar och utveckling av en tillståndsekvation som kan beskriva sprängämnets detonationsegenskaper.

I grova drag kan det experimentella arbetet delas in i två delar, dels data som är nödvändiga för att ta fram brinnmodellens parametervärden, dels data som kan användas för att kontrollera dess förutsägelser. Hittills har brinnekvationers matematiska form i huvudsak varit fenomenologisk, dvs de flesta parametrarna har inte varit direkt

relaterbara till de fysikaliska förloppen och därmed inte varit möjliga att bestämma direkt ur försök.

En parameter som är kvalitativt bestämbar är det lägsta initieringstryck som krävs för att få sprängämnet att reagera, även om det beror av försöksuppställningens detaljer såsom laddningens tjocklek och diameter, fördämningen, stötvågens utseende osv. Detta diskuteras mer ingående i avsnitt 2.5.

För övriga parametrar har vi varit tvungna att använda oss av passningsräkningar. Utgående från en parameteruppsättning har parametrarna ändrats tills en tillräckligt god överensstämmelse erhållits mellan beräknade och uppmätta värden för någon mätbar storhet. I vårt fall är variationerna hos detonationsfrontens krökning och detonationshastigheten med laddningsdiametern de centrala mätstorheterna. Räkningarna har utförts med det hydrodynamiska finitelementprogrammet Dyna2D /5/.



Figur 2: Schema över stegen i hur brinnmodellen bestäms.

I Figur 2 visas schematiskt hur brinnmodellen bestäms och vilka moment som ingår. Det börjar med bestämning av sprängämnets tillståndsekvation genom Hugoniotmätningar på emulsionsmatrisen och en beräkning av sprängämnets Hugoniot genom en teoretisk

ansats om mikrosfärernas inverkan. Dyna2D har också använts för att tolka Hugoniot-försöken som därigenom fått en enklare uppställning än som förutsågs från början.

Utöver Hugoniotdata behövs värdet för det s.k. Grüneisen-gamma. Detta beskriver i huvudsak hur tryckenergin fördelas mellan termisk och potentiell energi. Dess värde har vi måst ta ur litteraturen och det brukar ligga mellan 1,4 och 2,2.

För att bestämma spränggasernas tillståndsekvation har vi använt ett datorprogram för termokemiska beräkningar, Tiger /6/. För att få tillståndsekvationen hos blandningen av oreagerat sprängämne och spränggaser i reaktionszonen har slutligen en blandningsansats använts. Med dessa indata till Dyna2D har sedan passningsräkningarna för bestämning av parametrarna i brinnekvationen kunnat genomföras.

I avsnitt 2 nedan beskrivs kortfattat de olika projektdelarna. För detaljerna i projektarbetet, för formler med mera hänvisas till de delrapporter som publicerats i SveDeFo:s och SveBeFo:s rapportserier /7-13/.

2 PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

2.1 Litteraturstudier

Arbetet inleddes med en litteraturstudie om brinnmodeller och tillståndsekvationer för sprängämnen, Persson /7/. Studien visade att det fanns tre detonationsmodeller som borde bli föremål för fördjupat intresse. Två av dessa har använts för att beskriva detonationsförloppet i militära sprängämnen. Den ena har presenterats av Mader och Forest vid Los Alamos Scientific Laboratories /14/ och den andra av Lee och Tarver vid Lawrence Livermore National Laboratories /15/. Den tredje detonationsmodellen, som har presenterats av Kirby och Leiper vid ICI /4/, har använts för att simulera detonationen i kommersiella sprängämnen såsom emulsionssprängämnen.

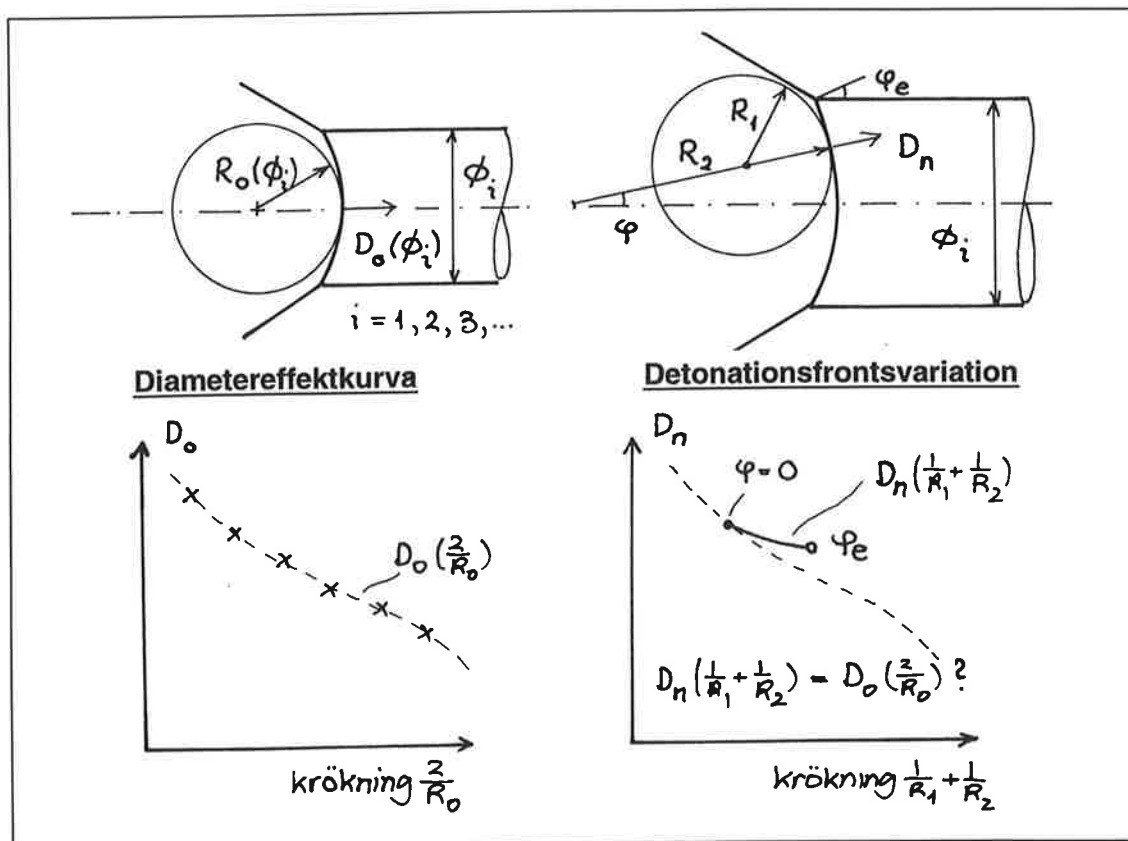
Till varje modell för icke-ideala detonationer erfordras en brinnmodell, dvs ett matematiskt samband som beskriver hur sprängämnet omsätts i detonationszonen. Mader och Forests brinnmodell /14/ kallas "forest fire". Dess parametrar bestäms ur initieringsexperiment med varierande stötamplitud.

Lee och Tarvers brinnmodell /15/ kallas "ignition and growth". Den är användbar även för icke helt ideala detonationer och har minst två termer varav den första beskriver initieringen eller upptändningen via särskilt känsliga punkter, s.k. "hot spots". Denna modell har implementerats i Dyna2D-programmet /5/. Där har modellen tre termer för att utöver initieringen kunna beskriva den fortsatta förbränningen såväl utifrån hot spots som den snabbare förbränningen i slutfasen då tryck och temperatur är höga.

Kirby och Leipers brinnmodell /4/ har också använts av bl.a. Sheahan och Minchinton /16/, Leiper och Kennedy /17/ och Leiper och du Plessis /18/. Den har samma uppbyggnad som "ignition and growth"-modellen men de matematiska funktionerna som styr de olika komponenternas bidrag i brinnförloppet ser annorlunda ut. Denna modell har med framgång tillämpats på typiska emulsionssprängämnen. ICI har utvecklat ett optimeringsprogram för bestämning av modellparametrarna med utgångspunkt från enkla försök där detonationshastigheten och dess diameterberoende bestäms.

För att beskriva tryck-volym-energisambanden för såväl oreagerat sprängämne som reaktionsprodukter använder Lee och Tarver tillståndsekvationer av Jones-Wilkins-Lee-typ (JWL). Dessa finns implementerade i Dyna 2D men måste förses med lämpliga parametervärden. Mader och Forest /14/ använder ett annat samband som de kallat HOM-tillståndsekvationen och som anpassas till typen av komponenter i reaktionszonen.

Under projekts gång presenterades ytterligare en detonationsmodell av Jaimin Lee vid New Mexico Institute of Technology /19/ som tillämpats på bl.a. emulsionssprängämne. Denna har härletts ur Bdzils teori om "detonation shock dynamics" /20/. Den ekvation som beskriver förbränningen i sprängämnet synes vara en modifierad Arrheniusekvation.



Figur 3: Kan diametereffekten erhållas ur variationerna längs detonationsfronten?

Enligt Bdzil beror detonationshastigheten vid nära ideala förhållanden, dvs när reaktionszonens djup är litet jämfört med krökningsradien, entydigt på den lokala krökningen hos detonationsfronten. Se Figur 3. Med detta synsätt kan diametereffektkurvan, dvs detonationshastighetens längs axeln på en cylindrisk laddning och dess beroende av laddningens diameter lika gärna beskrivas av hastighetsvariationerna längs en enda detonationsfront med varierande krökning. Om så är fallet kan man inskränka provningen för ett givet sprängämne till en enda laddningsdiameter. Det har Lee /19/ gjort. För att kunna lita på resultaten måste man emellertid verifiera att antagandena i Bdzils teori gäller, se avsnitt 3.1 nedan.

Likaledes bygger ICI:s brinnmodellarbete på förenklande antaganden om "small divergent flow", Kirby och Leiper /4/, som gör att detonationen i en cylindrisk laddning

matematiskt kan behandlas som endimensionell och stationär. Även om vi från början i projektet hade tänkt utnyttja sådana förenklande antaganden i bestämningen av brinnmodellparametrarna, så blev vi under arbetets gång alltmer övertygade om att det var bäst att inte göra det. Därför användes genomgående Dyna2D i beräkningarna.

2.2 Hydrodynamiskt finitelementprogram, Dyna2D

Som framgått av tidigare avsnitt har simuleringar med det hydrodynamiska finitelement-programmet Dyna2D spelat en central roll i projektet. Som namnet antyder är Dyna2D avsett för beräkningar i två rumsdimensioner. Det kan alltså klara av antingen plana eller cylindersymmetriska geometrier. I vårt fall är den senare geometrin den relevanta.

En PC-version av programmet anskaffades i slutet av 1990 från Livermore Software Inc /5/ och implementerades först på en IBM kompatibel s.k PC-dator med en 80386 processor. Denna var emellertid för långsam för de stora matriser och vektorer som programmet arbetar med. Under 1991 köptes därför en PC-dator med 80486 processor en hårddisk med 600 Mb minnesutrymme. Det blev då möjligt att köra simuleringar med upp till 10.000 element i modellen med beräkningstider på ett par timmar.

Efter kontakt med Livermore Software fick SveDeFo även kopior av några av de källfiler som behövs för att lägga in andra brinnmodeller i stället för den "ignition and growth"-modell /15/ som implementerats i Dyna2D.

Programvara som Dyna2D har normalt en hel del fel, s.k. "buggar", samt svårgenomträngliga och ofullständiga manualer. Därför har Junhua Deng använt en hel del tid för att testa programmet. Dessa erfarenheter har samlats i en kompletterande manual, Deng /8/, som gör programmet lättare att använda för oerfarna användare. Numeriska simuleringar med Dyna2D kan ändå inte sägas vara lätta att utföra. Varje ny geometrisk modell leder normalt till specifika komplikationer som kan vara svåra att komma runt.

Under 1994 har beräkningskapaciteten förbättrats genom inköp av en PC-dator med s.k. Pentium-processor. Med denna är beräkningstiderna nere i 10-20 min för normala problem och beräkningskapaciteten begränsas inte längre av datorn.

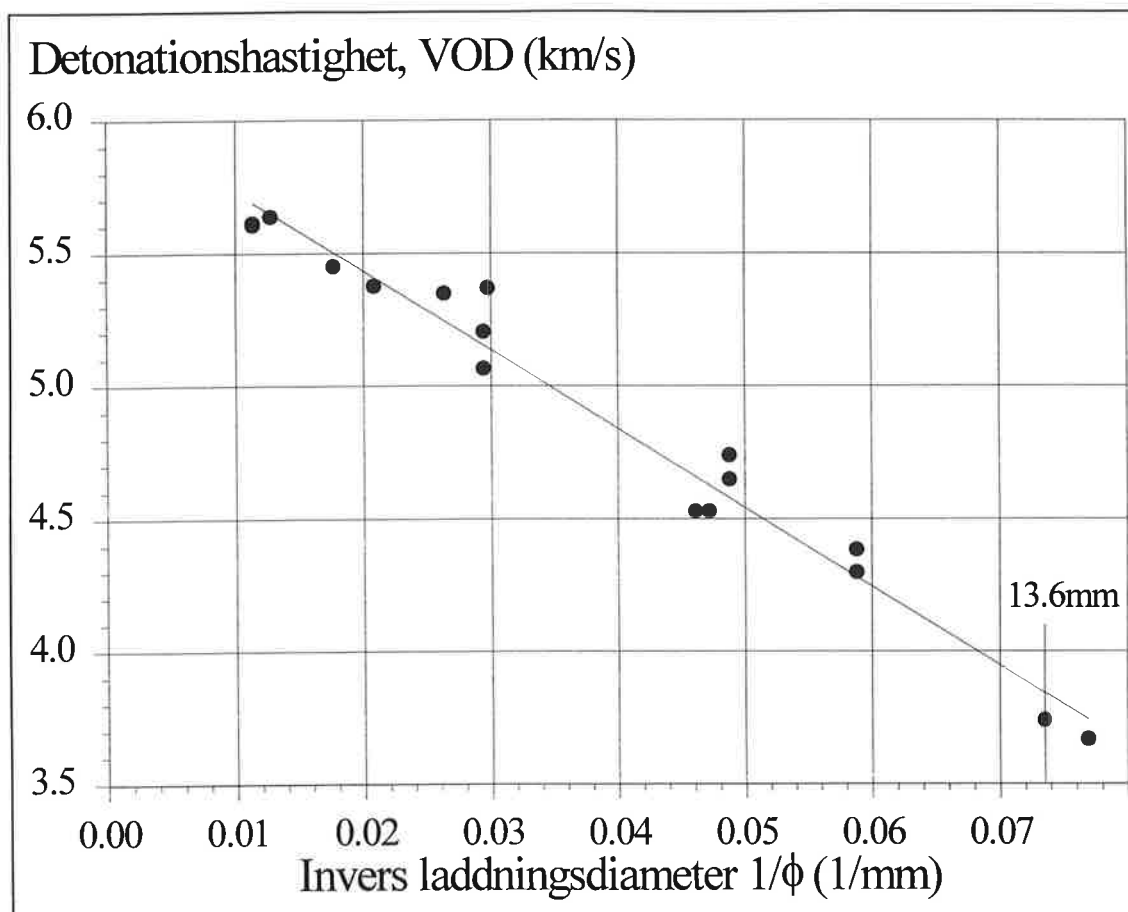
Dessutom har i slutet av 1995 en ny version av Dyna2D köpts från Hydrossoft International, Murphy m.fl. /21/. Den har flera fördelar som ökat beräkningskapaciteten ytterligare, bl.a. flera materialmodeller och möjligheter att snabbare köra flera och större problem efter varandra. Denna version används också av FOA.

2.3 Mätning av detonationshastigheten

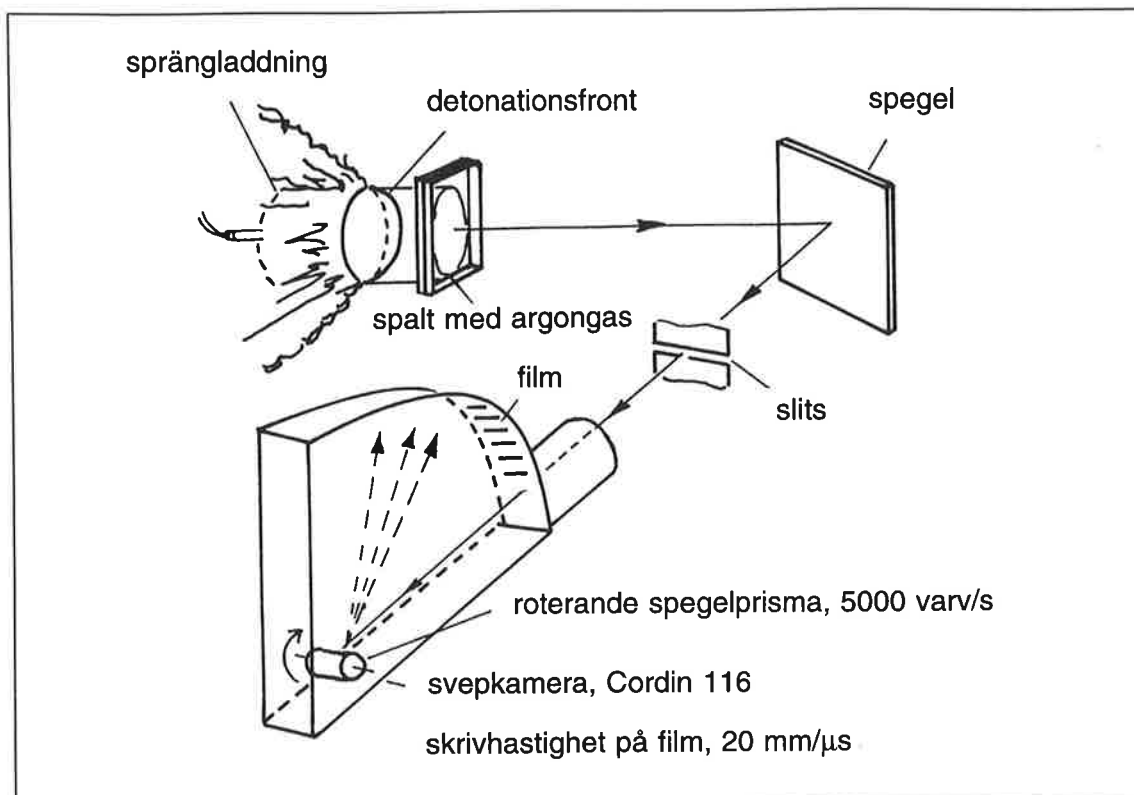
Parallellt med litteraturstudien startades arbetet på projektdelarna 3 och 6. I samarbete med Nitro Nobel AB och Kimit AB bestämdes ett recept för det emulsionssprängämne vars brinnmodell skulle bestämmas. Valet blev ett emulsionssprängämne baserat på ren AN som syregivare, se avsnitt 1.2. Det har kallats "emulsion K1" i projektet.

Detonationshastigheten (VOD) hos cylindriska laddningar av emulsion K1, inneslutna i tunna plaströr med innerdiameterar i intervallet 12-88 mm, har mätts både av Kimit AB i Kiruna och av SveDeFo, se Nyberg m.fl. /9/. För bestämning av VOD-värdena har ljusledare stuckits in i laddningarna och detonationsfrontens ankomst som funktion av tiden registrerats. Typiska avstånd mellan två ljusledare har varit 30-150 mm.

Hastighetsvärdena för de olika mätserierna visar någorlunda god överensstämmelse och den kritiska diametern för emulsion K1 bedöms vara ca 13,6 mm. Se Figur 4.



Figur 4: Mätta VOD-värden som funktion av laddningsdiametern ϕ för emulsion K1.



Figur 5: Försökupställning för fotografering av detonationsfrontens krökning.

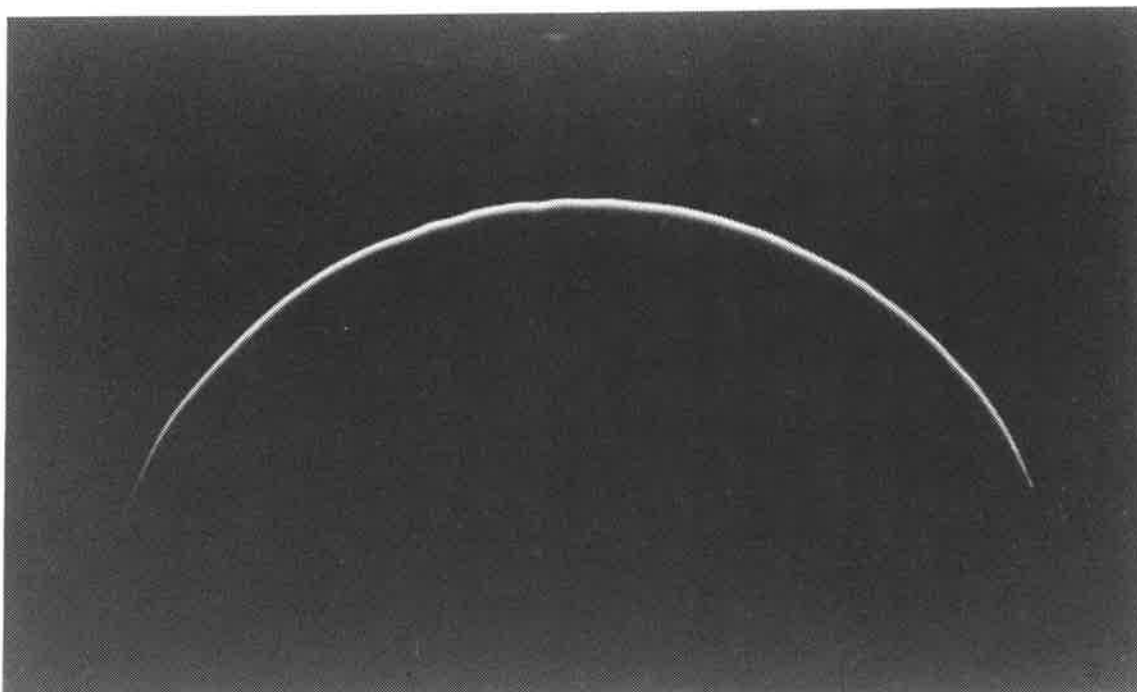
2.4 Mätning av detonationsfrontens krökningsradie

Mätningarna av detonationsfrontens krökningsradie kom igång under 1991. Genom att använda vår höghastighetskameran Cordin modell 116 i s.k. svepmod kunde ankomsttiden för detonationsfronten till ändytan i en cylindrisk laddning studeras, med god tidsupplösning. Se Figur 5.

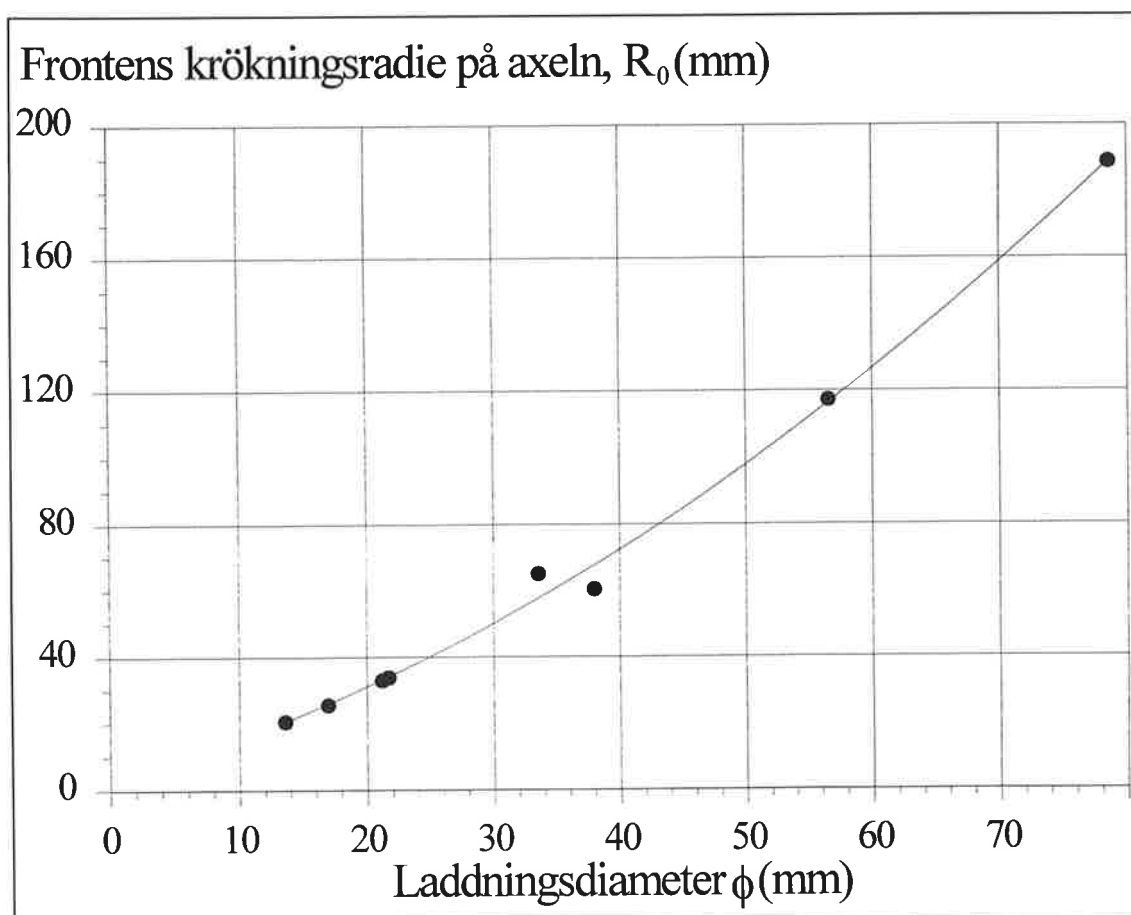
En tunn spalt fylld med argongas framför laddningens ändyta gjorde det möjligt att få en tydlig registrering av detonationsfrontens ankomst till laddningsytan genom att gasen börjar lysa när den utsätts för frontrycket. Se Figur 6.

För att få en större bild vid små laddningsdiameter måste fältlinsens brännvidd ökas. Fotografierna av detonationsfronten digitaliserades och krökningsradien mättes först i frontens första del, dvs i princip längs laddningens axel genom en cirkelanpassning. Senare bestämdes krökningen längs hela fronten med en anpassad ellips.

Med denna teknik har krökningsradien för emulsion K1 studerats i cylindriska laddningar inneslutna i tunnväggiga plaströr med innerdiameter mellan 13,6 och 78,6 mm, se



Figur 6: Bild av detonationsfronten i en laddning med diametern $\varnothing = 78,6$ mm.



Figur 7: Krökningsradien längs laddningsaxeln som funktion av laddningsdiametern.

Nyberg m.fl. /9/. Flera försök gjordes med de olika diametrarna. Registreringarna visar att detonationen inte alltid fortplantar sig symmetriskt kring laddningsaxeln i alla experiment men i de flesta fall har felet varit litet.

Ett samband mellan laddningsdiameter och krökningsradien längs laddningsaxeln, R_0 , har kunnat bestämmas. Se Figur 7.

Enligt den ursprungliga planen skulle ytterligare en eller flera sorters emulsionssprängämne ha studerats, varav en med hög halt sfärer. Detta har inte hunnits med.

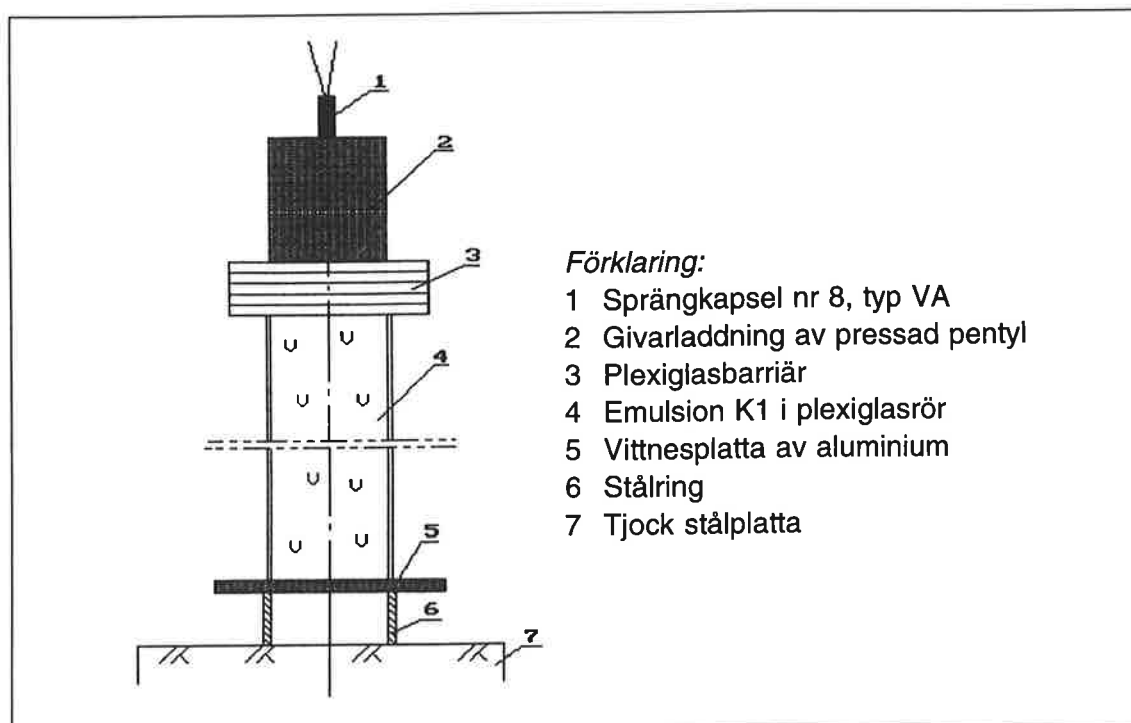
2.5 Mätning av minsta initieringstryck i sprängämnet

Brinnekvationen i vår brinnmodell, ekvation 8 i avsnitt 2.8, innehåller som parameter initieringskänsligheten uttryckt som den minsta, kritiska kompression som krävs för att omsättningen skall initieras, μ_c . I våra brinnstudier har vi bara gjort försök med full detonation. Då kommer alltid initieringstermen i brinnekvationen att starta när den inerta stötfrenten (detonationsfronten) anländer och värdet på μ_c kan sannolikt väljas ganska okritiskt.

Vid försök med lägre belastningsnivåer, t.ex. vid försök med laddningar med underkritisk diameter eller vid stötblastning kommer inverkan av μ_c att vara betydligt större. Ett exempel på ett sådant prov är beskjutningsprovet. I detta bestäms den lägsta, kritiska hastigheten där den av stöten orsakade förbränningen övergår till detonation (SDT). Denna anslagshastighet är vid plana förhållanden entydigt relaterbar till ett minsta, kritiskt tryck eller μ_c .

Att åstadkomma plana förhållanden i försök är relativt krävande, därför valdes det något lättare barriärprovet. Mätning av initieringskänsligheten hos emulsion K1 medelst detta prov kom igång i början av 1992, se Nie m.fl. /10/. I provet utsätts sprängämnet för stötvågen från en cylindrisk givarladdning av ett väldefinierat sprängämne med bestämda dimensioner och densitet, här pressad pentyl. Se Figur 8.

Genom att placera en barriär, dvs en bricka eller klots av t.ex. plexiglas (PMMA), mellan givarladdningen och den likaledes cylindriska emulsionsladdningen kan amplituden hos den infallande stötvågen varieras. Genom att öka eller minska plexiglasbarriärens tjocklek i en serie prov finner man en barriärtjocklek för vilken hälften av mottagarladdningarna initieras till detonation. Denna tjocklek får definiera den kritiska eftersom stötamplituden då nätt och jämt förmår att initiera sprängämnet till detonation.



Figur 8: Försökuppställning för barriärprovet.

Provet är emellertid beroende av såväl diameter som inneslutning. Om mottagarladdningens diameter ökas finner man att initiering kan åstadkommas genom en tjockare plexiglasklots, dvs med en lägre stötamplitud. Samma effekt har en kraftigare inneslutning såsom stålrör. I samtliga våra experiment har diametern varit 35 mm för såväl givare som mottagarladdning. Den senare var innesluten i tunna rör av plexiglas.

För att kunna bestämma amplituden på den stötvåg som passerar in genom ytan på mottagarladdningen måste stötvågen "kalibreras". Detta utfördes först med hjälp av elektromagnetiska hastighetsgivare vars princip beskrivs i avsnitt 2.6 nedan. Med dessa mättes partikelhastigheten i den stötvåg som fortplantar sig genom barriären.

Hugoniot-ekvationen för ett material ger sambandet mellan partikelhastigheten och stötvågshastigheten i materialet. Tillsammans med densiteten ger sedan dessa båda hastigheter stötvågstrycket. Om Hugoniot-sambandet för plexiglas är känt kan således stötvågstrycket i barriären på olika avstånd från givarladdningens ändyta beräknas om partikelhastigheten är känd och genom upprepade försök med olika tjocka barriärer kan stötvågstrycket som funktion av barriärtjockleken bestämmas.

Amplituden på den stötvåg som fortplantar sig in i sprängämnet beror emellertid också på förhållandet mellan stötimpedanserna i plexiglas respektive emulsionen. I vårt fall

stötimpedansen lägre i emulsionen och den stötvåg som passerar in i sprängämnet får en lägre amplitud än den hade i plexiglasbarriären.

Det finns en grafisk metod med vars hjälp man kan bestämma stötvågsamplituden i emulsionen, den s.k. impedansanpassningsmetoden. Den kräver att man känner Hugoniot-sambandet både för plexiglas och för det odetonerade emulsionssprängämnet.

Det finns många data för plexiglas i litteraturen /22/ men Hugonioten för emulsion K1 måste bestämmas. Tekniken för att bestämma denna redovisas i avsnitt 2.7. Härigenom kunde det minsta initieringstrycket i emulsionen uppskattas till 1.63 GPa för 35 mm laddningsdiameter /10/.

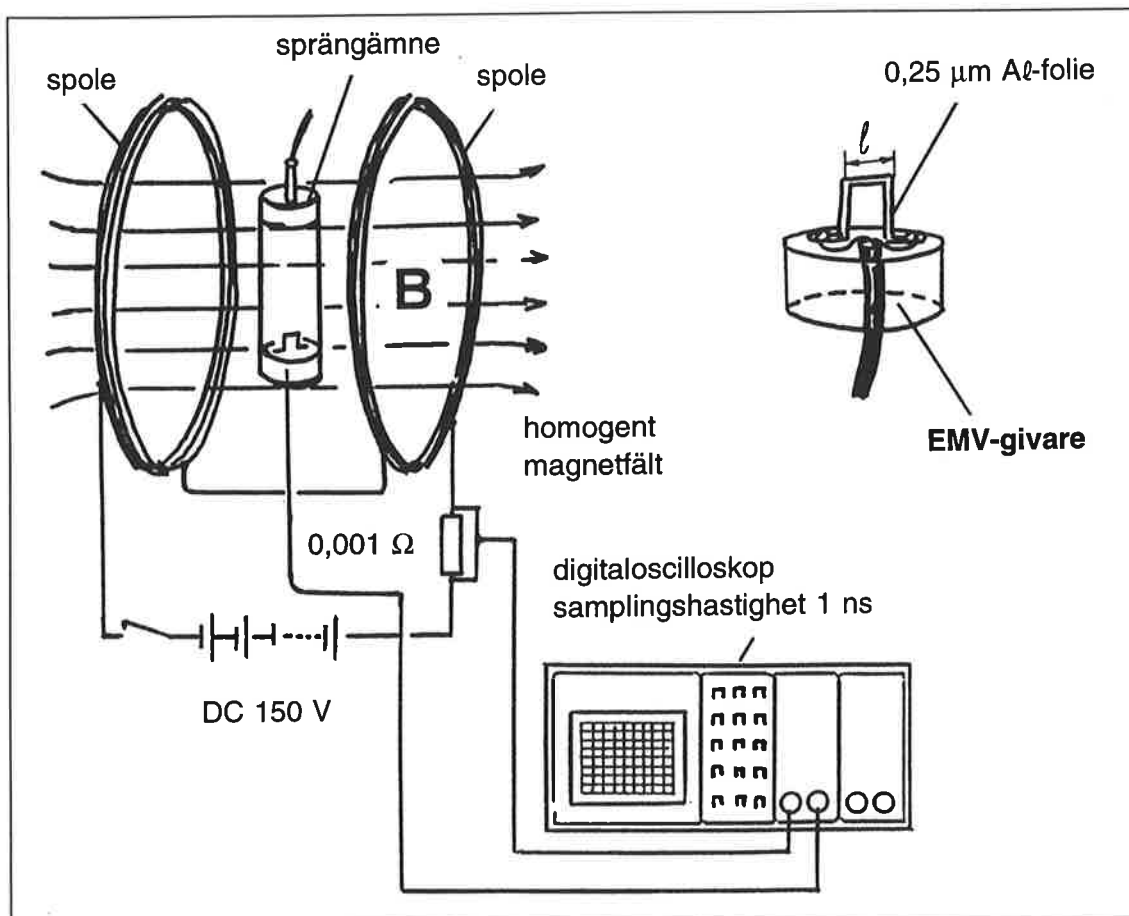
Detta minsta initieringstryck varierar med diametern och strängt taget skulle nya barriärprov behöva göras för att kunna extrapolera resultaten till mycket stora diametrar. Ändå återstår inverkan av stötvågens form och varaktighet m.fl. faktorer innan värdet kan konverteras till den lokala storheten μ_c . Därför har denna parameter i praktiken också bestämts vid passningsräkningarna och det i barriärprovet mätta värdet endast behandlats som en relativt grov indikation på det rätta värdet.

2.6 Partikelhastighetsmätningar i detonerande sprängämne

Dessa mätningar kom igång under våren 1992. De skulle användas till att kalibrera barriärproven och till att bestämma sprängämnets Hugoniot. De syftade också till att kunna bestämma reaktionszonens längd och partikelhastigheten i detonationszonen framför CJ-planet i laddningar av emulsion K1, vilket sedan kan användas som en kontroll av brinnmodellens förutsägelser för en annan försöksuppställning än den som använts vid parameterbestämningen.

Mätningarna utfördes med en elektromagnetisk metod i vilken en s.k. EMV-givare (electro-magnetic velocity gauge) används. Mätprincipen bygger på att en slinga av t.ex. tunn metallfolie placeras i det material man önskar undersöka. Det kan vara sprängämne eller inert material såsom plexiglas.

Mätanordningen placeras i ett konstant homogent magnetfält alstrat av ett spolsystem. Vid stötvågens passage kommer en bestämd del av slingan att röra sig med samma hastighet som materialet och vinkelrätt magnetfältet. Se Figur 9. I slingan uppstår då en elektromotorisk kraft som är proportionell mot materialhastigheten, dvs. mot partikelhastigheten.



Figur 9: Princip för EMV-mätning av partikelhastigheten i detonerande sprängämne

Arbetet inleddes med att utprova ett mätsystem med magnetspoler av enkel och billig konstruktion. Vi skulle då kunna tillåta oss att lägga spolarna så nära laddningarna att spolarna demolerades i varje försök. Det visade sig emellertid att vi med detta system inte fick ett tillräckligt starkt magnetfält. Ett spolpar med större diameter införskaffades och försågs med ett skyddande hölje av rostfritt stål. Därefter vidtog mätningar av partikelhastigheten i plexiglas vilket kunde användas för kalibreringen av barriärprovet.

Mätningar i detonerande sprängämne inleddes sedan med att studera cylindriska laddningar av nitrometan som är ett lättflytande och transparent sprängämne varpå motsvarande försök gjordes i emulsion K1. Åtskilliga experiment fick göras med placeringen av laddningen och dess kabelanslutningar för att få störningsfria registreringar. Dessvärre gjorde den upprepade stöbelastningen på spolsystemet att isolationen av tråden i spolarna skadades och gjorde dessa omöjliga att använda. Några nya spolar har inte skaffats eftersom Hugoniotbestämningen kom att utföras med en annan mätmetod, vilken beskrivs i avsnitt 2.7 nedan.

Persson m.fl. /11/ redovisar resultaten av de studier av partikelhastigheten i detonerande nitrometan och emulsion K1. De visar att det var möjligt att mäta partikelhastigheten i emulsionssprängämnet även om olika elektriska störfenomen först måste elimineras. Att bestämma detonationszonens längd var dock omöjligt eftersom ingen förändring i partikelhastighetens avtagande som indikerar läget hos CJ-planet, det plan bakom vilket underljudsströmning råder, kunde observeras i dessa experiment.

En beräkning av partikelhastigheten i CJ-planet för den experimentellt uppmätta detonationshastigheten visade att EMV-givaren i några experiment kollapsat innan denna hastighet registrerats. Magnetspolarna skadades emellertid innan tillräckligt antal experiment för en riktig analys gjorts. Då data inte direkt behövdes för bestämningen av brinnmodellparametrarna och andra enklare uppställningar kan användas som kontroll av brinnmodellen, t.ex. beskjutningsprov, avbröts försöken. Arbetet med EMV-metoden har dock gett gruppen sådan erfarenhet av metoden att den kan användas senare.

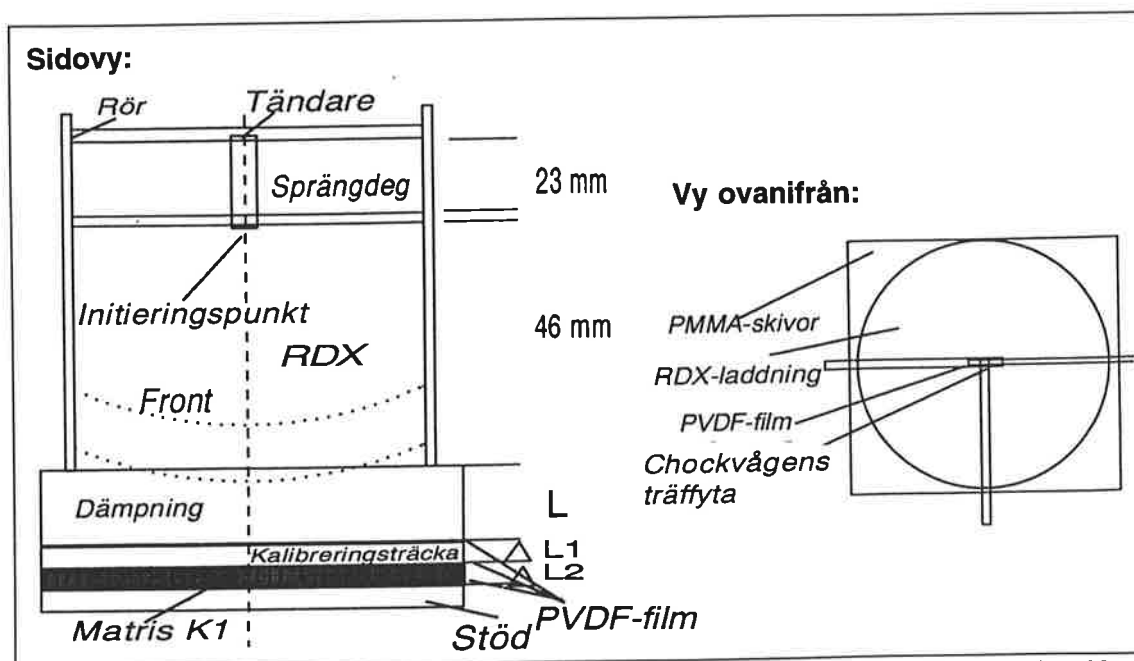
2.7 Mätning av emulsionsmatrisens Hugoniot

Enligt den ursprungliga projektplanen skulle bestämningen av Hugoniot-ekvationen för odetonerad emulsion K1 göras med EMV-tekniken. Efter diskussioner med Henrik Almström valdes en annan försöksmetodik. Experimentuppställningen kan liknas vid ett instrumenterat barriärprov, se Figur 10.

En cylindrisk laddning av hexogen placeras ovanpå en stapel bestående av en tjockare skiva (5-50 mm) och en tunnare skiva av plexiglas (2 eller 5 mm), ett skikt av matrisen till emulsion K1 (2 eller 5 mm) samt ytterligare en plexiglasskiva av godtycklig tjocklek.

Egentligen vill vi ha Hugoniot-data för höga tryck för ett sprängämne som är opåverkat av en eventuell reaktion. Sprängämnet kommer emellertid att reagera vid höga tryck och hindra registreringen. Därför kan vi bara få data vid låga tryck och för att undvika reaktion så används enbart matrisen till emulsion K1, dvs den produkt som sedan tillsammans med tillsatta mikrosfärer bildar sprängämnet.

I gränssytorna mellan plexiglasskivorna och i gränsskikten mellan plexiglas och matris placerades remsor av piezoelektrisk folie som ger en laddningspuls när stötvågen passerar. Folien placerades utmed laddningsaxelns förlängning då stötvågen som sänds genom laddningen av hexogencylindern inte är plan. Passagetiden genom de olika skivorna registrerades med ett tvåkanaligt digitaloscilloskop, LeCroy 720Q.



Figur 10: Försöksupställning för mätning av Hugoniot för matrisen till emulsion K1.

Genom att använda den tunna plexiglasplattan som referensmaterial och antaga att den ur passagetiden beräknade stötvågshastigheten är representativ för den stötvåg som passerar in i matrisen kan man med hjälp av Hugoniot-sambandet för plexiglas bestämma partikelhastighet och stöttryck i kontaktytan mellan plexiglas och matris.

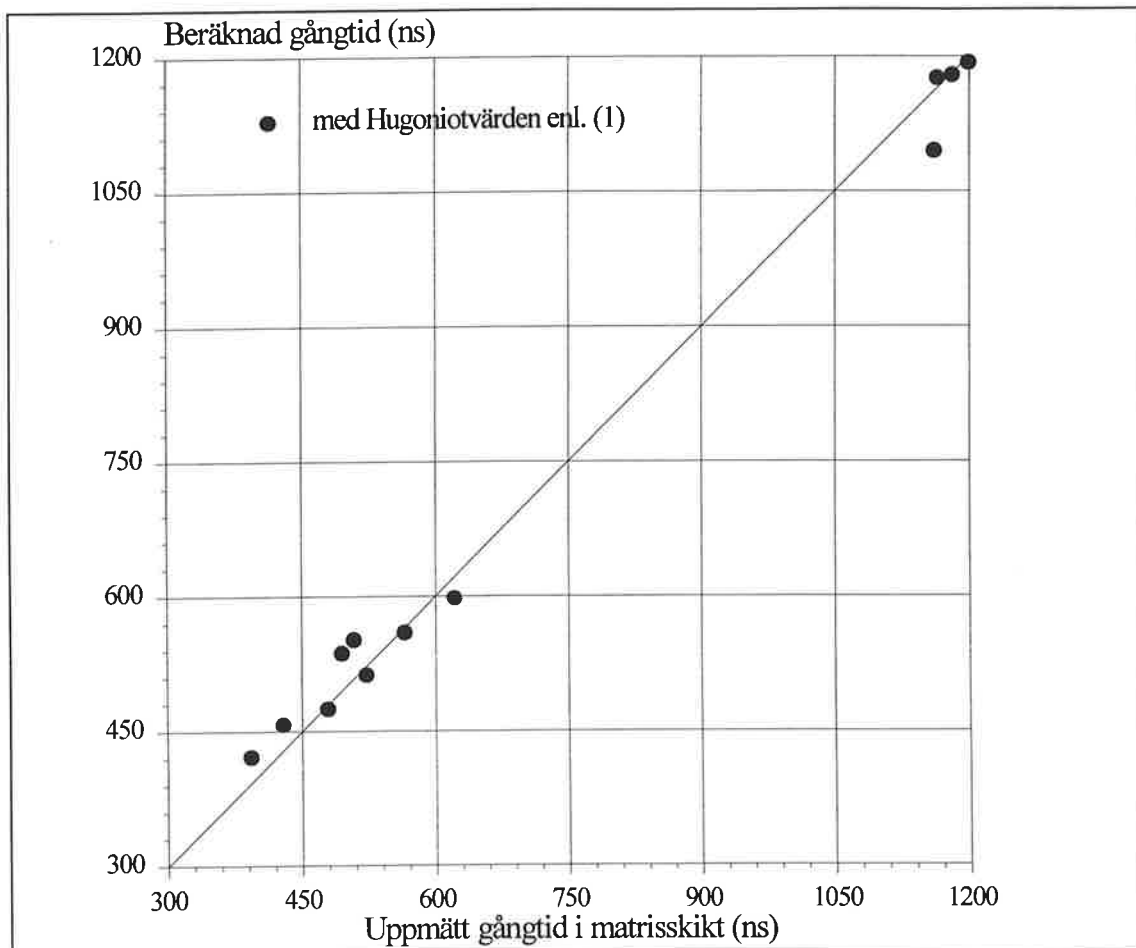
Passagetiden genom matrisen ger ett medelvärde på stötvågshastigheten i matrisen. Man kan då använda sig av impedansanpassningsmetoden, se avsnitt 2.5. Genom att avsätta samband i tryck-partikelhastighetsplanet och utnyttja kontinuitetsvillkor för gränssytan bestäms partikelhastigheten i matrisen. Metoden förutsätter att Hugoniot-ekvationen för plexiglas är väl känd. Frågan är dock om plexiglas som levereras av olika tillverkare har samma egenskaper vid stötblastning och hur experimenten i litteraturen, som ligger till grund för de olika uppgifterna, påverkat givna materialdata /22/.

Resultaten kontrollerades genom att simulera experimentet med Dyna2D, vilket blev den metod vi till slut kom att helt förlita oss på, Nyberg och Deng /12/. Bestämningen har gjorts i 2 steg genom passningsräkningar. I det första kalibreringsteget har beräknad gånghastighet för stötvågen genom plexiglasskivan jämförts med uppmätta värden. Plexiglasets Hugoniot-parametrar varierades tills överensstämmelsen blivit tillräckligt god. Som utgångspunkt användes de värden som uppskattades med hjälp av impedansanpassningsmetoden. Resultaten kom att skilja en del från litteratordata /22/.

I nästa steg användes samma teknik för att få överensstämmelse mellan beräknade och mätta gångtider för stötvågen genom matrisen. Se Figur 11. Gångtidsdata från 12 försök och Hugoniot-data från kalibreringen av plexiglas gav matrisens Hugoniot-ekvation som

$$U_s = 2.26 + 1.554 \cdot U_p \text{ i km/s.} \quad (1)$$

De Hugoniot-koefficienter för plexiglas och matris som erhållits på detta sätt har använts även vid bestämningen av minsta initieringstryck i barriärprovet /10/. Det nya värdet blev 4,5 GPa, vilket är avsevärt högre än impedansanpassningsmetodens 1,63 GPa.



Figur 11: Beräknad gångtid mot uppmätt, från Hugoniotförsöken med matris K1.

2.8 Bestämning av brinnmodellparametrar för emulsion K1

Bestämningen av brinnmodellparametrarna genom passningsräkningar med Dyna2D startade i slutet av 1993. Detta har redovisats internt av Deng m.fl. /13/ och externt av Ouchterlony /23/. Arbetsgången beskrivs i flödesschemat i Figur 4.

Bestämningen av tillståndsekvationen för det oreagerade sprängämnet startade med bestämningen av emulsionsmatrisens Hugoniot, se avsnitt 2.7 ovan. Med kännedom om denna har en Hugoniot för det sprängämnet, dvs matris plus mikrosfärer, beräknats med antagande att gasen i mikrosfärerna förhåller sig som en ideal gas, se Chan /24/ och Voskoboinikov /25/. Hugoniot-ekvationen har sedan omformats till en isentrop och anpassats till JWL-form. Värdet för Grüneisens gamma uppskattades ur litteratordata och sattes lika med 1,5. När detta värde är konstant kan energiekvationen för explosivämnet (index e) skrivas

$$p_e = A_e[1-\omega_e/(R_{1e}\cdot x_e)]\cdot\exp(-R_{1e}\cdot x_e) + B_e[1-\omega_e/(R_{2e}\cdot x_e)]\cdot\exp(-R_{2e}\cdot x_e) + \omega_e\cdot e_e/x_e \quad (2)$$

där p_e är trycket, $x_e = v_e/v_o$ den relativa specifika volymen och e_e energidensiteten samt A_e , B_e , ω_e , R_{1e} och R_{2e} är de parametrar som bestäms av anpassningen. I Dyna2D måste ett extra bivillkor uppfyllas, att begynnelsevärdet på energidensiteten är noll.

Beräkningen av tillståndsekvationen för reaktionsprodukterna startade i sin tur med utgångspunkt från ingående komponenter med hjälp av dataprogrammet Tiger /6/. Expansionsisentropen som erhålls i form av punktdata var sedan utgångspunkt för en JWL-anpassning med resultat att energiekvationen fick formen

$$p_g = A_g[1-\omega_g/(R_{1g}\cdot x_g)]\cdot\exp(-R_{1g}\cdot x_g) + B_g[1-\omega_g/(R_{2g}\cdot x_g)]\cdot\exp(-R_{2g}\cdot x_g) + \omega_g\cdot e_g/x_g \quad (3)$$

där index g anger storheter och parametrar för de gasformiga reaktionsprodukterna.

För blandningen av reagerat och oreagerat sprängämne i reaktionszonen antas lokal tryckjämvikt, $p = p_e = p_g$, råda. Volymitets- och energiekvationerna får en enkel blandningsform,

$$v = (1-\lambda)\cdot v_e + \lambda\cdot v_g \text{ och} \quad (4)$$

$$e = (1-\lambda)\cdot e_e + \lambda\cdot e_g - q\cdot\lambda, \quad (5)$$

där q är reaktionsvärmets värde och λ den relativa andelen reagerat sprängämne.

I Dyna2D's brinnmodell antas temperaturjämvikt råda lokalt, $T_e = T_g = T$, varför två tillståndsekvationer krävs, en för explosivämnet och en för gaserna. I Dyna2D antas vidare det specifika värmets värde vid konstant volym, C_v , vara konstant, dvs oberoende av temperaturen för båda medierna var för sig. Detta ger slutligen de tillståndsekvationer som Dyna2D utnyttjar,

$$p_e = A_e \cdot \exp(-R_{1e} \cdot x_e) + B_e \cdot \exp(-R_{2e} \cdot x_e) + \omega_e \cdot C_{ve} T / v_e \quad (6)$$

$$p_g = A_g \cdot \exp(-R_{1g} \cdot x_g) + B_g \cdot \exp(-R_{2g} \cdot x_g) + \omega_g \cdot C_{vg} T / v_g \quad (7)$$

Avsnitten 2.3 och 2.4 har kort redovisat de mätningar av detonationshastigheten och detonationsfrontens krökningsradie som utgör utgångspunkten för passningsräkningarna. Totalt har 17 VOD-värden och 8 värden på krökningsradien R_0 längs laddningens symmetriaxel använts.

Den brinnekvation som valdes kommer från Lee och Tarver /15/. Endast två av tre ingående termer användes emellertid, den initieringsterm som representerar upptändning runt mikrosfärerna och den tillväxtterm som representerar en volymförbränning, Murphy et al. /21/. Orsaken är dels att kvalitén på våra ingångsdata inte klarar flera parametervärden på ett trovärdigt sätt, dels att beräkningarna koncentrerats på den tidiga delen av detonationsförloppen och att emulsion K1 inte innehållit några fasta partiklar som aluminiumflingor vars förbränning sker förhållandevis sent under reaktionsförloppet.

Brinnekvationens form kan skrivas

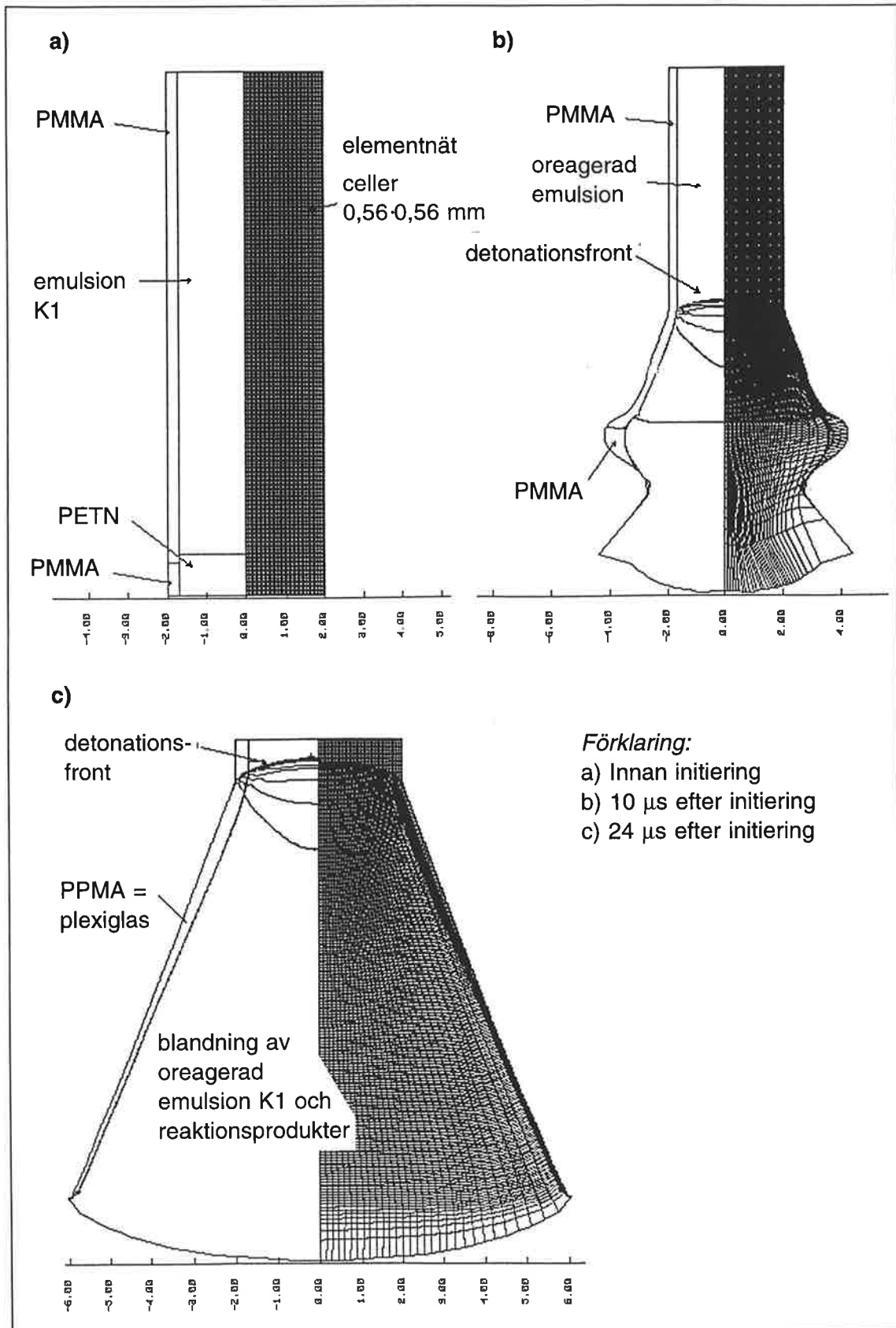
$$d\lambda/dt = f \cdot \theta(\lambda_{krit} - \lambda) \cdot (1 - \lambda)^{\alpha_1} \cdot \theta(\mu_e - \mu_c) \cdot (\mu_e - \mu_c)^{\beta_1} + g \cdot (1 - \lambda)^{\alpha_2} \cdot \lambda^{\alpha_3} \cdot p^{\beta_2}. \quad (8)$$

Här betecknar μ_e sprängämnets relativa kompression eller volymitetsminskning och p trycket. Vidare betecknar $\theta(z)$ en stegfunktion som antar värdet 0 när $z \leq 0$ och värdet 1 när $z > 0$. Alltså kopplas initieringstermen till när $\mu_e > \mu_c$ och från när $\lambda \geq \lambda_{krit}$. Leiper and Kennedy /17/ använde en liknande ekvation och deras erfarenheter har varit värdefulla för oss.

Det återstår 9 materialparametrar att bestämma; f , g , μ_c , α_1 , α_2 , α_3 , β_1 , β_2 och λ_{krit} . Enligt diskussionen i avsnitt 2.5 är μ_c emellertid troligen rätt irrelevant.

Elementnätet i Dyna2D-modellen vid olika skeden under en beräkning visas i Figur 12. Elementstorleken är typiskt 1-2 celler/mm. Stötvågens ankomst till laddningens ändyta antas sammanfalla med en partikelhastighet om 300 m/s. Ankomsttiden bestämdes genom interpolation av undanlagrade nodförskjutningsdata från post-processorn vid en tidpunkt när VOD-värdet blivit stationärt. Valet av 300 m/s beror på att då bedöms argongasen i spalten vid laddningens ändyta börja lysa.

För en bedömning av beräkningsresultatets kvalitet användes minsta kvadratmetoden, tillämpad på skillnaden mellan beräknade och uppmätta värden för VOD och kröknings



Figur 12: Elementnätet i Dyna2D-modellen vid tre olika tidpunkter i en beräkning.

radien R_o . I godhetstalet Q gavs båda serierna med mätdata samma vikt genom att försöksvärdena användes för en normalisering. Passningsräkningarnas syfte var alltså att minimera Q med avseende på parametervärdena i brinnekvationen, ekvation 5.

Efter många inledande beräkningar, fastställdes flera av parametervärdena. Tryck-exponenten β_2 gavs värdet 2,0 då emulsion K1 bedöms vara känsligare än krut och okänsligare än vanliga militära sprängämnen. Likaså gavs kompressionsexponenten β_1 värdet 2,0, baserat på dess inflytande på VOD för små diametervärden. Slutligen så hölls den kritiska kompressionen μ_c tillfälligt inom 0,08-0,10 för eventuell senare finjustering.

Dyna2D-utvärderingen av barriärprovet gav ett lägsta initieringstryck på $p_c = 0,045$ Mbar vilket motsvarar $\mu_c = 0,26$. Den dåliga överensstämmelsen mellan värdena är inte underlig med hänsyn till de begränsningar som diskuterades i avsnitt 2.5.

Brinnekvationen i Dyna2D innehåller stegfunktioner θ som kopplar ifrån eller slår på vid givna λ -värden. I ekvation 8 finns en sådan som kopplar ifrån initieringstermen innan den blivit försumbar. Detta orsakade en abrupt minskning i brinnhastigheten $d\lambda/dt$ som resulterade i numeriska instabilitetsproblem för några kombinationer av parametervärden.

Dessa problem löstes genom att sätta $\lambda_{krit} = 0,5$ och ersätta $(1-\lambda)$ faktorn med $(1-2\lambda)$ i initieringstermen så att stegfunktionen kopplar ifrån när initieringstermens bidrag blivit försumbart. Härigenom blev övergången något jämnare. Valet av faktorn 2 i parentesen är dock en uppskattning utan exakt fysikalisk grund.

Efter åtskilliga beräkningar, där främst olika tillväxttermer testats, befanns följande två parameteruppsättningar vara bäst

$$d\lambda/dt = 5 \cdot \theta(1-2\lambda) \cdot (1-2\lambda)^{1/9} \cdot \theta(\mu_e - 0,09) \cdot (\mu_e - 0,09)^2 + 180 \cdot (1-\lambda)^{2/9} \cdot \lambda \cdot p^2 \text{ och} \quad (9)$$

$$d\lambda/dt = 4,5 \cdot \theta(1-2\lambda) \cdot (1-2\lambda)^{2/9} \cdot \theta(\mu_e - 0,09) \cdot (\mu_e - 0,09)^2 + 270 \cdot (1-\lambda)^{2/3} \cdot \lambda^{2/9} \cdot p^2 \text{ och} \quad (10)$$

Den första ekvationen gav en god överensstämmelse med våra VOD och R_o -data för små laddningsdiametrar $\emptyset$ medan överensstämmelsen var sämre för de större diametrarna. Den andra gav en utmärkt överensstämmelse med alla R_o -data oavsett $\emptyset$ medan beräknade VOD-värden hela tiden låg ca 5% för högt.

Vidare gav ekvation 10 en kritisk diameter på ca 10 mm medan ekvation 9 gav 12 mm vilket stämmer bättre med det experimentellt grundade värdet 13,6 mm. Tyvärr verkade det inte finnas något sätt att åstadkomma en god överensstämmelse i alla led.

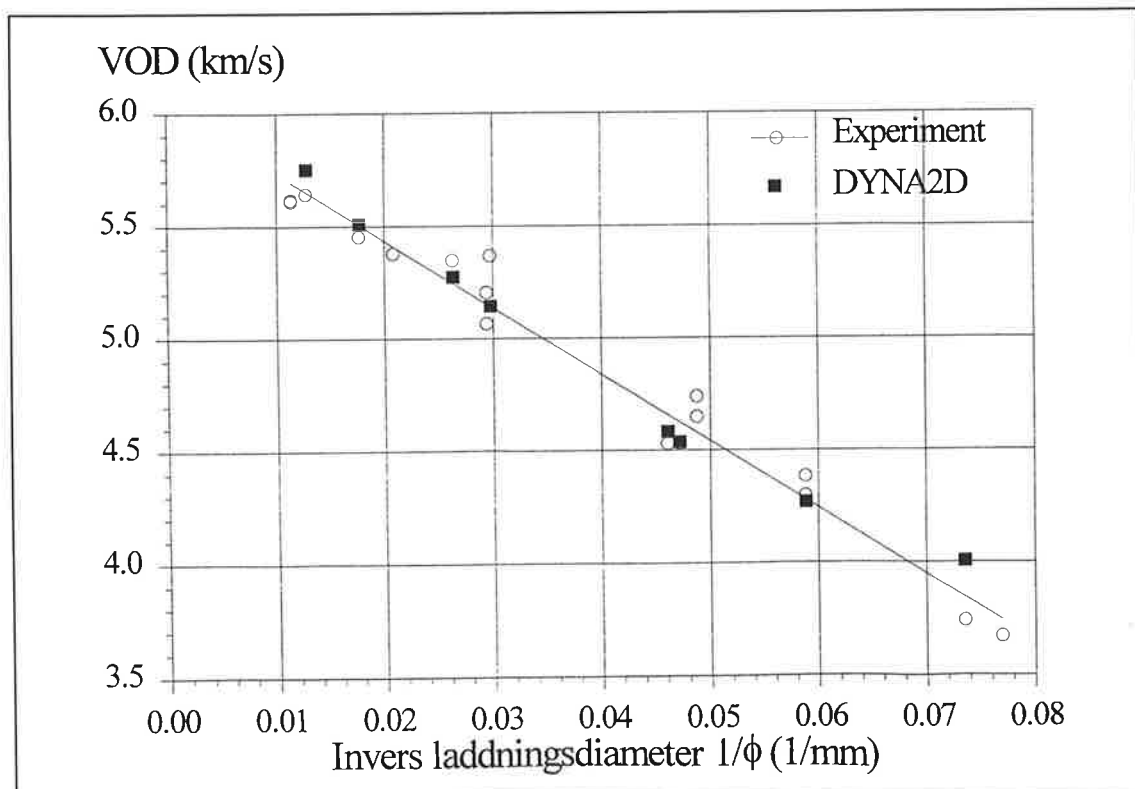
Att modellera detonationen hos de större laddningarna borde vara lättare än att modellera detonationen hos klenare. Att detta inte lyckades helt med ekvation 9 kan tyda på att geometrin hos förbränningen, som kommer till uttryck i exponenterna i tillväxt-termen, är felaktig. I detta avseende verkar parametrarna i ekvation 10 vara bättre då överensstämmelsen med alla R_o -data är utmärkt.

Problemet med överskattningen av VOD-data löstes genom att minska reaktionsvärmets q från 3,2 MJ/kg till 2,8 MJ/kg. Den bästa parameteruppsättningen i brinnmodellen blev

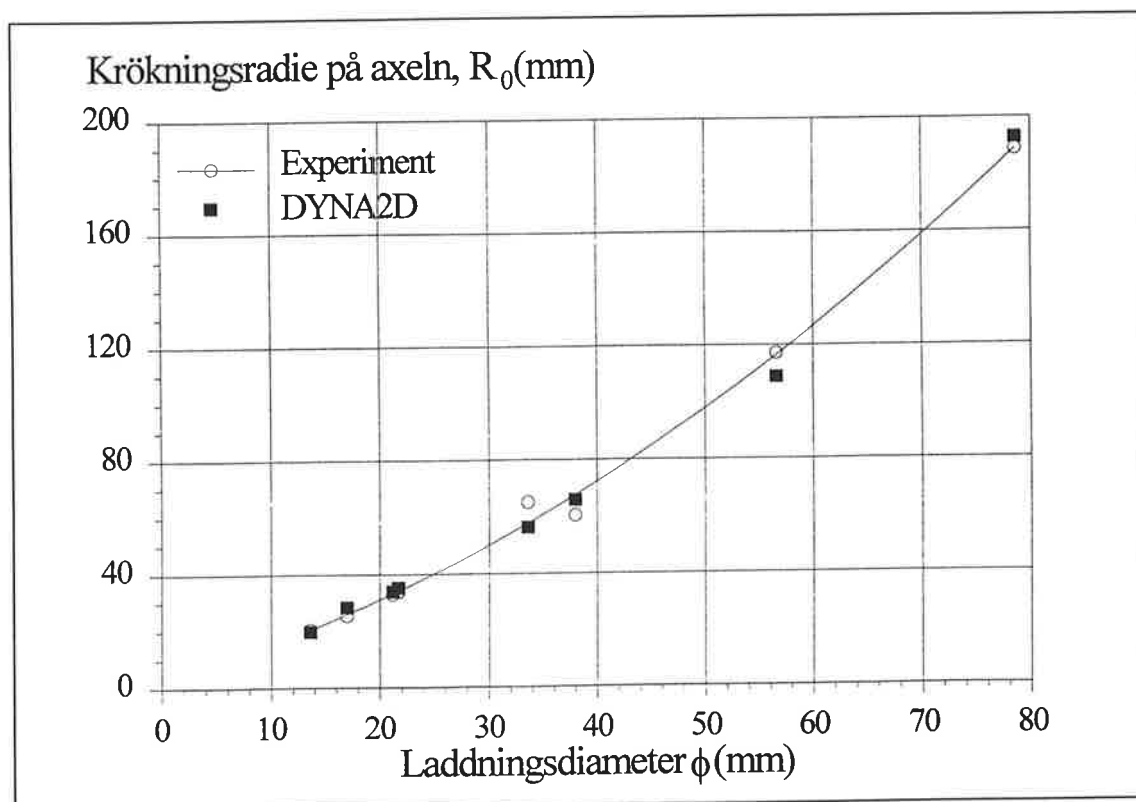
$$d\lambda/dt = 5 \cdot \theta(1-2\lambda) \cdot (1-2\lambda)^{2/9} \cdot \theta(\mu_e - 0,09) \cdot (\mu_e - 0,09)^2 + 300 \cdot (1-\lambda)^{2/3} \cdot \lambda^{2/9} \cdot p^2 \text{ och} \quad (11)$$

Överensstämmelsen mellan beräknade och mätta data visas i Figur 13 och 14. Den genomsnittliga skillnaden mellan VOD-värdena är ca 1% och motsvarande för R_o -värdena ca 2%.

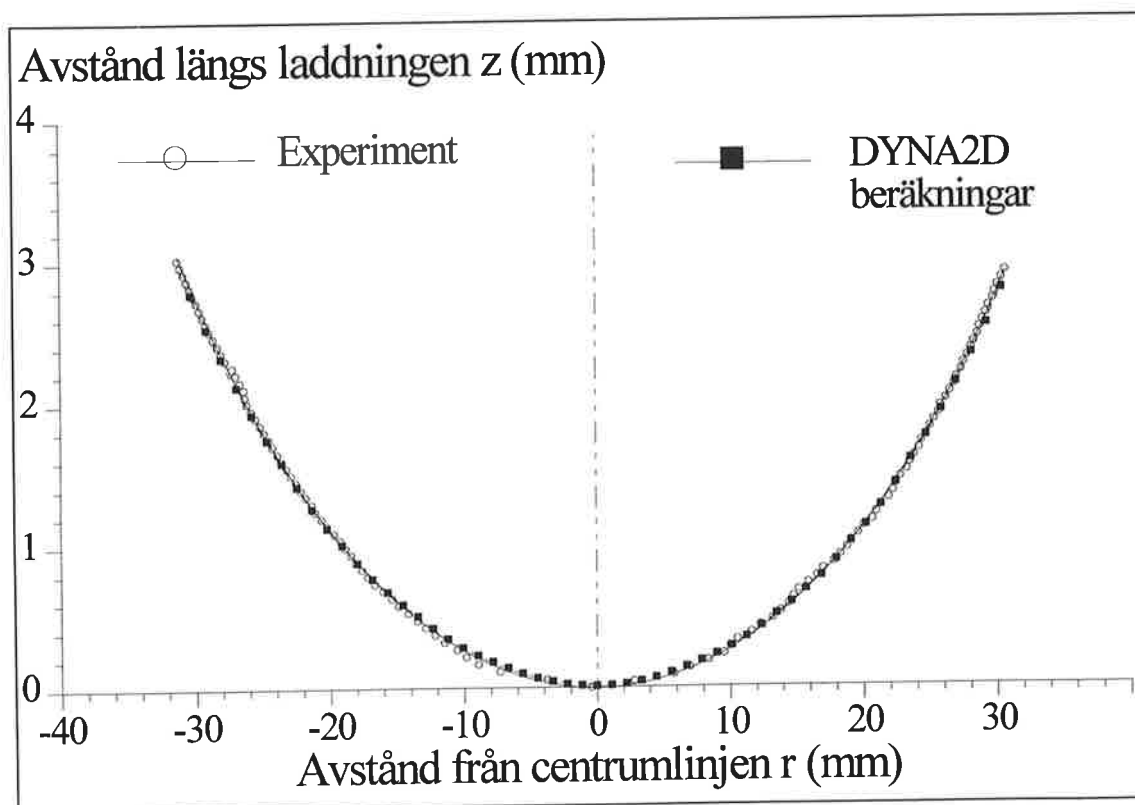
Figur 15 visar den nära totala överensstämmelsen mellan beräknad och uppmätt detonationsfront för den största laddningsdiametern, $\varnothing = 78,6$ mm. Brinnekvationen för emulsion K1, ekvation 11 med ingående parametervärden, och tillhörande tillståndsekvationer för emulsionen och spränggaserna är huvudresultatet av arbetet inom projekt K1,



Figur 13: Jämförelse av beräknade och uppmätta värden VOD($1/\varnothing$) för emulsion K1.



Figur 14: Jämförelse av beräknade och uppmätta värden $R_0(\phi)$ för emulsion K1.



Figur 15: Jämförelse av beräknad och uppmätt form hos fronten för $\phi = 78,6$ mm.

"Tillståndsekvationer och brinnmodeller för kommersiella sprängämnen". Vi har genom detta visat att vi, liksom ICI och några andra, kan ta fram en beskrivning av sprängämnets egenskaper som gör det möjligt att med mycket stor noggrannhet återge den icke-ideala detonationen i en cylindrisk laddning av emulsion K1 oberoende av diametern.

Detta arbete kan följaktligen med största sannolikhet upprepas för både för andra emulsionsrecept och andra typer av sprängämnen.

3 DISKUSSION AV RESULTATEN

3.1 Diskussion av giltighet och antaganden

Brinnmodellen gäller strängt taget bara för detonationsförloppet i den geometri som den kalibrerats mot. Därför har referensgruppen vid olika tillfällen diskuterat hur man kan verifiera modellens giltighet, dels för andra storheter i kalibreringsuppställningen än dem som mätts i våra försök, dels för andra detonations- eller stötförlopp. Sådana kontrollmöjligheter finns delvis i redan framtagna data:

- EMV-mätning av partikelhastigheten bakom detonationsfronten i en cylindrisk laddning med emulsion K1, avsnitt 2.6.
- EMV-mätning av partikelhastigheten i plexiglas i barriärprovet, avsnitt 2.5.
- Den kritiska amplituden på den infallande stötvågen i barriärprovet, avsnitt 2.5.

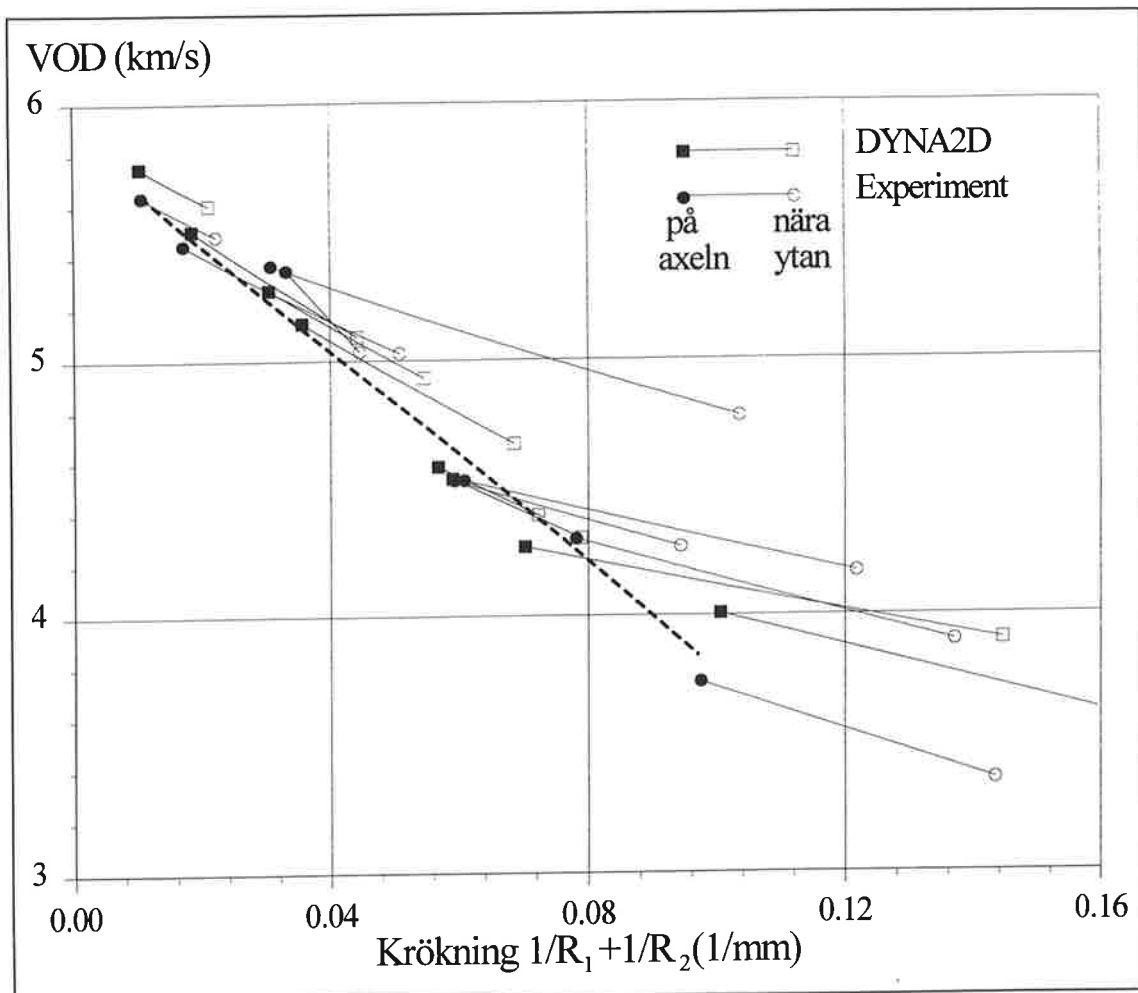
Dessa data har ännu inte använts för att kontrollera brinnmodellen.

Däremot har försök liknande kalibreringsuppställningen simulerats, men med laddningen innesluten i stålrör i stället för i plaströr. För emulsion K1 i stålrör med innerdiametern 38 mm uppmättes en VOD på 5460 m/s. Simuleringen med vår brinnmodell gav värdet 5450 m/s. Detta ökar brinnmodellens trovärdighet. Motsvarande värde för emulsion K1 i plaströr är 5250-5300 m/s och skillnaden till stålrörsvärdet sannolikt signifikant.

En annan fråga är om det varit nödvändigt att använda Dyna2D i kalibreringen av brinnmodellen, Lee /19/ och Kirby och Leiper /4/ har ju använt sig av förenklande antaganden om detonationsförloppet som kraftigt reducerat det nödvändiga arbetet. En konsekvens av dessa är i Lees arbete att detonationshastighetens längs axeln på en cylindrisk laddning beroende av laddningens diameter lika gärna kan beskrivas av hastighetsvariationerna längs en enda detonationsfront med varierande krökning, se avsnitt 2.1.

Figur 16 visar en plott av VOD i våra försök och från Dyna2D-simuleringarna som funktion av inversa krökningsradier. Varje heldragen delkurva visar hur VOD och krökningsradie förändras längs detonationsfronten i en av våra laddningar, från laddningens symmetriaxel och utåt mot mantelytan. Den streckade kurvan i figurens nedre del motsvarar diametereffektkurvan och har erhållits ur linjerna i Figur 13 och 14.

Om förutsättningarna i Lees arbete /19/ skulle gälla för emulsion K1 så skulle alla delkurvorna sammanfalla med den streckade. Både våra försök och våra simuleringsresultat avviker emellertid från ett sådant beteende för de klara laddningarna och ingen delkurva täcker hela diametereffektkurvan. Därför är Lees förutsättningar en onödigt begränsande förenkling som kan leda till felaktiga tolkningar av mätresultaten.



Figur 16: Plott av VOD(krökning) för emulsion K1, beräknade och uppmätta värden.

Figur 16 visar att både VOD- och krökningsvärdena varierar mindre längs fronten på en laddning ju större den blir. Ju mindre variationsintervallet är desto osäkrare blir rimligen bestämningen av parametrarna i brinnekvationen. Avvikelsen mellan en enskild uppmätt delkurva och motsvarande beräknade kurva kan dessutom vara ganska stor. Faran är att en bestämning av brinnekvationparametrar baserad på en enstaka kurva ger väldigt osäkra värden.

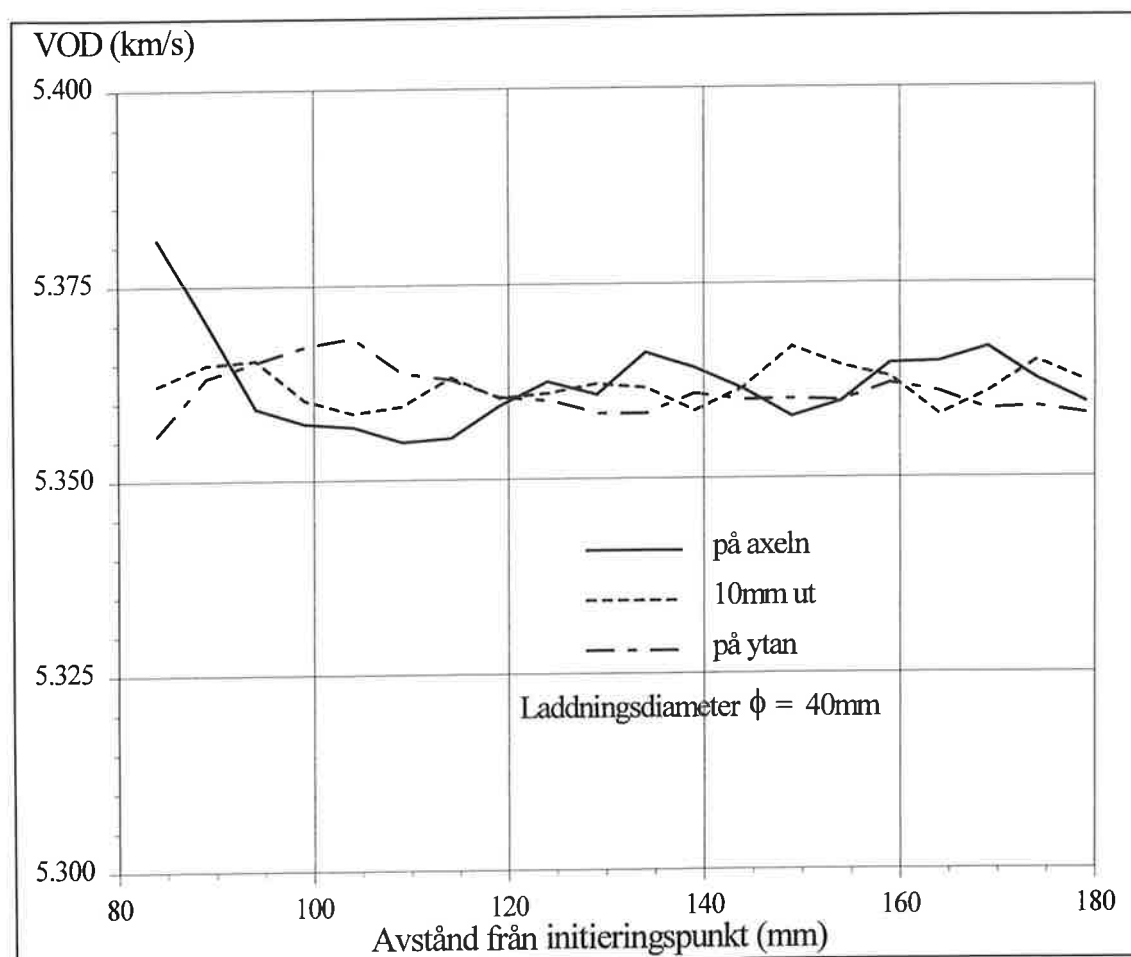
Å andra sidan visar Figur 16 att ju större variationsintervallet blir desto kraftigare avviker delkurvorna från diametereffektkurvan. Om en bestämning av brinnekvationparametrarna baseras på en sådan delkurva så riskerar man att resultaten tolkas som en helt felaktig diametereffektkurva.

Vi tänkte i början av projektet använda oss av liknande förenklingar som ICI och CETR gjort. Då vi ändå kommit att utnyttja Dyna2D för utvärdering av Hugoniotförsöken och

Dyna2D kommer att användas när brinnmodellen skall tillämpas, så såg vi ingen fördel i att bygga in ostyrkta antaganden i bestämningen av brinnmodellen. Resonemangen ovan visar att detta var riktigt.

Med några undantag är delkurvorna från försök och beräkningar i Figur 16 relativt parallella. Möjliga förklaringar till de avvikelser som finns är en detonation som ännu inte stabiliserats, fel i VOD-mätningarna och fel som uppstått i detonationsfrontens form när den lämnat sprängämnet och passerar plexiglasskivan före argonspalten.

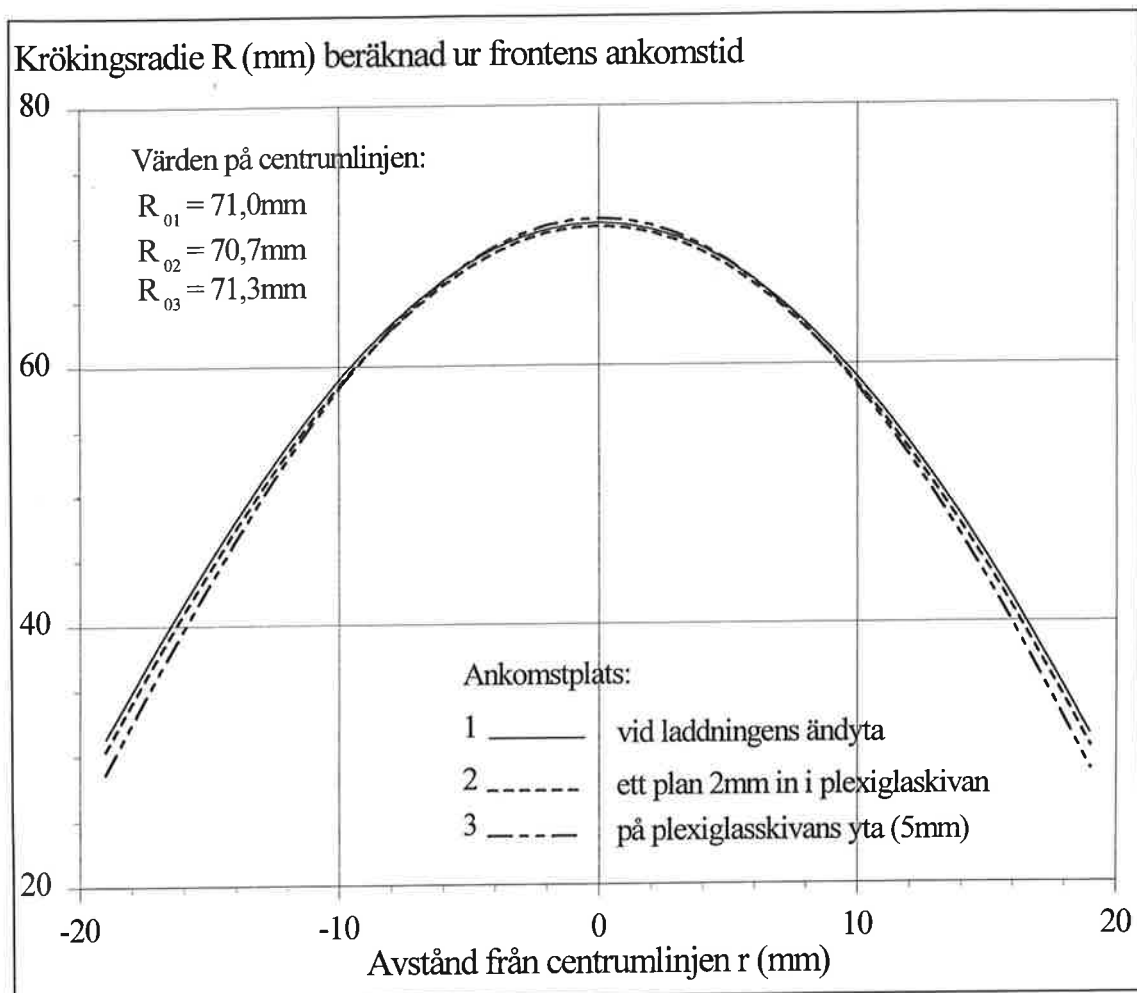
VOD mättes med optiska fibrer, typiskt på avstånden 30-150 mm. Det är bättre att använda en VOD-mätmetod med kontinuerlig registrering för då kan man lättare se om detonationen stabiliserats innan frontens utseende mäts. Som tumregel används ofta att detta sker inom 5-10 laddningsdiametrar. Av säkerhetsskäl kunde laddningar som var längre än ca 600 mm inte användas för den största laddningsdiametern, $\varnothing \approx 78,6$ mm.



Figur 17: Stabilisering av transient detonation efter initieringen.

Som efterhandskontroll har därför Junhua Deng simulerat detonationen i två laddningar med emulsion K1, $\varnothing = 40$ och 80 mm. Resultaten visar att detonationen stabiliseras inom ± 10 m/s över hela fronten redan efter ca $2,0-2,5\varnothing$, se Figur 17. Detta styrker antagandet om stationär detonation i laddningen när frontens utseende mäts. Däremot kan en eventuell inverkan av inhomogeniteter i sprängämnet inte uteslutas.

Resultaten från en simulering av hur en 5 mm tjock plexiglasskiva mellan sprängämnets ändyta och argonspalten påverkat den uppmätta formen hos detonationsfronten visas i Figur 18. Den visar hur detonations- eller stötvågsfrontens ankomsttid till ett plan uppfattas av kameran. Inom laddningens mittdel är skillnaden i krökningsradie mindre än 1%, för en 2 mm plexiglasskiva är ännu mindre. Vi har aldrig använt plexiglasskivor som varit tjockare än 5 mm, oftast har de varit 2 mm. Därför är plexiglasskivans inverkan på krökningsvärdena obetydlig jämfört med mätfel och andra onoggrannheter.



Figur 18: Uppskattning av plexiglasets inverkan på detonationsfronten.

I antagandena bakom bestämningen av brinnmodellen ligger att spränggasernas expansion kan beskrivas av en JWL-ekvation likt ekvation 2. Våra VOD- och krökningsradie-mätningar är dåliga test på om detta stämmer eller inte. Ett mycket bättre test är enligt Henrik Almström /26/ s.k. cylinderexpansionsprov.

3.2 Förbättring av mätmetoder

En förbättring av mätmetoderna är nödvändig av flera skäl. Dels måste noggrannheten i mätningarna bli bättre så att resultatens trovärdighet ökar. Dels måste de samtidigt förenklas och antalet minskas från nuvarande 10-20 st om Hugoniotförsöken inkluderas, så att kostnaderna för att ta fram en brinnmodell minskar.

En nödvändig förbättring av mätningarna som diskuterades i avsnitt 3.1 var övergången till kontinuerliga VOD-mätningar. Under 1995 har Shulin Nie testat ut en sådan teknik som baseras på en utanpåliggande höghögtryck strömmatad motståndsstav som kortsluts av detonationen. Stavarna levereras av MREL Applied Explosives Research i Kanada.

Försöksuppställningen för Hugoniotmätningar har förbättrats av Junhua Deng under 1995 och vi har köpt ett nytt 4-kanaligt oscilloskop LeCroy 9354A, för att öka datafångsten.

Vi har också diskuterat möjligheten att ersätta den fotografiska bestämningen av detonationsfrontens krökning med en metod med optisk fibrer som inte kräver användning av höghastighetskamera. Detta har emellertid inte fullföljts ännu.

3.3 Fortsatt arbete

Fortsättningen på arbetet inom projekt K1 har av referensgruppen delats upp i två delar. Den första är framtagning av brinnmodelldata för nya sprängämnen och det görs inom ramen för SveBeFo projekt nr 181, "Brinnmodelldata för kommersiella sprängämnen". I detta arbete ingår förbättring av de mätmetoderna som är nödvändiga för att bestämma brinnekvationparametrarna.

Den andra delen av det fortsatta arbetet inriktas på att utveckla ny mätmetoder, dels sådan som kan användas för att verifiera brinnmodellens riktighet, dels alternativ till de gamla mätmetoderna. Detta görs i samarbete med FOA under SveBeFo projekt nr 182, "Vidareutveckling av brinnmodell i samverkan med FOA". Syftet med detta mer långsiktiga arbete är att kvalitativt och kvantitativt kunna beskriva händelseförloppet i ett

godtyckligt sprängämne med sådan noggrannhet att dess verkan på omgivande material kan förutsägas och beräknas med tillräcklig noggrannhet. En detaljerad beskrivning av det arbetet hör emellertid inte hemma i denna rapport.

Referensgruppen för detonik /26/ har beslutat att i första hand ta fram brinnmodellparametrar för varianter på receptet för emulsion K1. Följande varianter valdes ut

- K1a: Ursprungsreceptet, matris (77,5% AN, 14,7% vatten, 3,9% olja och 0,7% emulgeringsmedel SMO) samt 3,1% mikrosfärer räknat på vikt. Matrisdensitet 1380 kg/m³ och sprängämnesdensitet 1160-1170 kg/m³,
- K1b: Samma matrisproportioner men 1,9% mikrosfärer, slutdensitet ca 1250 kg/m³,
- K1c: Samma matrisproportioner men 4,8% mikrosfärer, slutdensitet ca 1090 kg/m³,
- K1d: Samma grundsprängämne som K1a med tillsats av 3% aluminiumkorn,
- K1e: Samma grundsprängämne som K1a med tillsats av 6% aluminiumkorn,
- K1f: Som K1a men ändrad matris med 16,1% vatten och 76,1% AN i matrisen,
- K1g: Som K1a men ändrad matris med 17,5% vatten och 74,7% AN i matrisen.

Här varieras systematiskt viktiga parametrar som halten mikrosfärer, vattenhalten i matrisen och mängden tillsatta aluminiumkorn. Det är parametrar som sprängämnestillverkaren kan ändra för att ge sprängämnet önskade egenskaper. Vårt syfte är att se hur dessa variationer påverkar främst parametervärdena i brinnekvationen för att se vilka som är relativt känsliga för receptet och vilka som är relativt okänsliga.

Resultaten skall också, genom den koppling till verkan som Dyna2D-simulering ger, kunna användas för att ge sprängämnet önskade verkansegenskaper. Dessutom skall resultaten förhoppningsvis ge ett underlag för en mer fysikaliskt inriktad form på brinnekvationen. Under 1995 har arbetet med att ta fram brinnmodelldata för varianterna K1b och K1e påbörjats.

4 NYTTAN AV RESULTATEN

4.1 Om brinnmodellers användning och begränsningar

Brinnmodeller för sprängämnen kan användas till en mer detaljerad beskrivning av deras detonations- och förbränningsförlopp än vad som är möjligt med hjälp av teorin för ideala detonationer. Modellens komplexitet kräver emellertid att man använder avancerade beräkningsmodeller såsom FEM-programmet Dyna2D eller liknande program för att kunna göra kvantitativa förutsägelser om förloppen.

Exempel på förlopp som kan simuleras är t.ex. laddningars detonation i borrhål i berg och initieringsfunktionen hos sprängkapslar eller kombinationen av sprängkapslar och laddningar. Möjligen kan även sprängämnens känslighet för stöt och tryckverkan i olika situationer simuleras. Det sistnämnda är SDT-förlopp för vilka parametrarna i brinnmodellen för emulsion K1 kan avvika från dem som ges i ekvation 11 i avsnitt 2.8. På den militära sidan finns också ett antal tillämpningar.

När det gäller laddningars detonation i borrhål så kan Dyna2D-simuleringar användas för att beräkna hur stor andel av sprängämnets energi som försvinner i stötvågen och hur stor del som kan utnyttjas i form av gasexpansionsarbete. Man kan beräkna hur dessa energiandelar beror på sprängämnes- och bergegenskaper, på hålstorlek och laddningens utformning för att på så sätt förbättra verkan. Med en databas för olika sprängämnen och receptvariationer kan man anpassa sprängämnet till berget på ett bättre sätt än idag.

För att kunna simulera förloppen väl med Dyna2D eller liknande program krävs

- en idealiserad beskrivning av problemet,
- möjlighet att tillräckligt detaljerat beskriva aktuell geometri,
- kunskap om materialparametrarna och
- att sprickbildning i materialen, t.ex. berget, inte uppträder.

Dessa faktorer innebär begränsningar.

Den idealiserade beskrivningen gäller främst att förhållandena i ett borrhål måste vara kontrollerade, dvs inget avbrott i laddsträngen, kunskap om hur eventuellt vatten är fördelat, relativt homogena bergförhållanden och homogent sprängämne osv. Den idealiserade beskrivningen gäller också geometrin.

Om geometrin är för komplicerad så blir elementnätet för stort, det ryms inte i datorns direktminne eller så tar beräkningarna för lång tid. Samtidigt får inte de förenklingar som

görs leda till att väsentliga delar av förloppen inte kan återges. Att hitta rätt förenklingsgrad kräver kompetens.

För en tvådimensionell beskrivning kan Dyna2D användas och beräkningarna rymms normalt gott och väl i en persondator eller en arbetsstation. Tredimensionella beräkningar kräver användning av t.ex. Dyna3D och är mycket resurskrävande. Sådana används vid simulering av fordonskollisioner mm. Med en enklare tvådimensionell beskrivning kan man på samma tid göra åtskilligt fler analyser än med en mer komplicerad tredimensionell beskrivning.

Materialparametrarna för såväl sprängämne som berg måste var kända. För att ta fram sprängämneparametrarna så kan metoderna i denna rapport användas, se avsnitt 4.2.

För berget så kräver Dyna2D sannolikt minst 6 st parametrar, men det kan räcka med att uppskatta dem. Det finns ett antal referenser i litteraturen som kan användas, t.ex. /22, 27 och 28/. Noggrannheten i beskrivningen av bergets egenskaper måste ställas i relation till hur dessa förväntas variera i fält.

Sprickbildning i materialen är en särskild punkt. Så länge den är så liten att det spruckna materialet kan beskrivas som ett kontinuum, t.ex. krossningen av borrhålsväggen runt ett fulladdat hål, så är allt väl om det krossade materialets egenskaper kan beskrivas. De långa radiella sprickor som bildas ställer till stora problem för Dyna2D-beräkningarna.

För det första så är en kontinuumbeskrivning inte längre tillräcklig utan programvaran måste kunna hantera elementomindelning och nya randvillkor. Sådant FEM-programvara finns redan för statiska 3D-beräkningar, t.ex. Dyskin m.fl. /29/. Song och Kim /30/ använder en annan metodik, en finindeldad massa-fjäder-modell, för att kunna räkna på uppsprickning runt borrhål i två dimensioner. Då försummas gasströmningen i hålet.

Radiella sprickor runt ett cylindriskt borrhål bryter vidare cylindersymmetrin och omöjliggör en fortsatt användning av Dyna2D för att beskriva förloppet.

Dessutom måste man kunna ta med gasströmning i sprickorna i beräkningen. Ett program som gör detta är ICI:s MB²DM, Minchinton /31/. Programmet är en kombination av Dyna2D och en distinkt-element-programdel i vilket gasströmningen tas med i beräkningen. Målet är att kunna modellera hela sprängningsförlopp, men än så länge endast i två rumsdimensioner. Ansatser att använda Itascas program PFC (particle flow code) finns också, Potyondy m.fl. /32/. Chiapetta /33/ leder vidare ett arbete där man strävar efter att göra liknande saker med ett antal länkade program.

Med sådana program kan man ännu inte beräkna hela förloppet i en stor sprängsalva; detonationen hos en följd av hål, krossningen, sprickbildningen och markvibrationerna i ett komplicerat samspel i ett sprickigt material samt kast och sprängskador. Därför kommer program som Sarmas /34/, i vilket effekten av en sprängning beräknas på lösare grunder, att fortsätta att spela en roll.

En annan begränsning i vår brinnmodells giltighet ligger i att den inte testats på mer än ett förlopp utöver det som legat till grund för bestämningen av parametrarna i brinnekvationen. Referensgruppen i detonik /26/ har diskuterat flera prov som på ett bredare sätt testar brinnmodellens och tillståndsekvationernas giltighet:

1. S.k. stöt-till-detonationsprov (SDT tests på engelska) som testar brinnmodellens förutsägelser om sådana förlopp. Två exempel är kilprov, med eller utan tryckgivare, och beskjutningsprov med metallkulor. Det senare liknar barriärprovet. Man erhåller den kritiska anslagshastigheten och med hjälp av passningsräkningar med Dyna2D kan nya brinnekvationparametrar för sprängämnet erhållas.
2. Cylinderexpansionsprov där mjuka metallrör accelereras av sprängämnet och den radiella expansionen mäts. Sådan prov sätter fokus på tillståndsekvationen för spränggaserna, vilken vi har bestämt med Tiger-beräkningar.

I mån av resurser bör brinnmodellens utsagor för något av dessa försök testas. Som nämnts i avsnitt 4.1 kan ekvationens parametervärden för SDT-förlopp i emulsion K1 komma att avvika från dem vi bestämt för rena detonationsförlopp.

Vid en samlad bedömning av nyttan av brinnmodeller, dvs en beskrivning av sprängämnen vars detonation är icke-ideal, måste man ta hänsyn till vad som fanns att tillgå innan. Teorin för ideala detonationer och de förenklingar som framförts i term av stövgas- och gasenergi som inneboende egenskaper i sprängämnet har inte gett en tillfredsställande beskrivning av t.ex. emulsionssprängämnens verkan. Brinnmodeller ger det.

Vidare så saknar vår metod att ta fram brinnmodellen den begränsande förenkling om tunna reaktionszoner som ligger bakom bl.a. CETR:s brinnmodell, se avsnitt 3.1. Därigenom uppstår inte samma tvekan om resultatens giltighet när vår metod tillämpas på blandsprängämnen med utdragna förbränningsförlopp, t.ex. sådana med aluminium i.

4.2 Vad krävs för att ta fram en brinnmodell

För att ta fram en brinnmodell krävs teoretiska samband, beräkningsprogram, materialdata från litteraturen, försök och utvärderingsteknik. Vi har valt en matematisk form för

brinnmodellen och använt både försök och beräkningar för att bestämma värdena på ingående parametrar. Se flödesschemat i Figur 4.

Av beräkningsprogramvara har vi utnyttjat följande

- Dyna2D, ett dynamiskt FEM-program som finns att tillgå på marknaden.
- Tiger, ett termokemiskt beräkningsprogram vars utveckling bekostats av amerikanska regeringen och är tillgängligt på marknaden.
- Vissa smärre beräkningsrutiner som vi utvecklat själva eller med hjälp av FOA.

Alla beräkningar kan utföras på persondator och för alla finns alternativ programvara att tillgå, både hydrodynamiska och termokemiska program. T.ex. kan alla smärre beräkningsrutiner läggas upp på ett sätt som minimerar egna programfel genom användning av program som MathCAD /35/.

För det oreagerade sprängämnet har vi använt oss av en beräkningsstödd (Dyna2D) experimentuppställning för bestämning av emulsionsmatrisens Hugoniot, se avsnitt 2.7. Uppställningen är relativt lättarbetad och innehåller ett kontrollmoment genom att gångtiden genom plexiglasets också mäts. Hugoniotförsöken är lätt att ställa upp och mätningarna kräver bara ett snabbt digitaloscilloskop. Däremot krävs Dyna2D-beräkningar för utvärderingen.

Därefter har sprängämnets Hugoniot beräknats, Grüneisens gamma har tagits ur litteraturen och data konverterats till en lämplig form för Dyna2D. För bestämning av spränggasernas tillståndsekvation har beräkningsprogrammet Tiger använts. För att få den erhållna överensstämmelsen har vi emellertid varit tvungna att sänka det beräknade reaktionsvärmets något, se avsnitt 2.8.

Dessa tre moment bygger på antaganden som vi inte har verifierat på annat sätt än att de totala beräkningsresultaten för en cylindrisk laddning stämmer mycket väl med de uppmätta, VOD och krökningsfront som funktion av laddningsdiametern i avsnitt 2.4 och 2.5. Dessa försök har också varit grunden för de passningsräkningar där brinnekvation-parametrarna bestämts, se avsnitt 2.8.

VOD som funktion av laddningsdiametern kan mätas i enkla försök. För mätning av detonationsfrontens utseende har vi däremot använt en höghastighetskamera i svepmod och skyddat kameran genom att placera laddningen i en sprängtank. Denna försöksuppställning kan förmodligen ersättas av en där ljusledare används för att ge krökningsfrontens utseende. Då behövs ingen höghastighetskamera.

Övriga försök är i dag inte nödvändiga för bestämning av brinnekvationparametrarna. Däremot kan de behövas för att verifiera att brinnmodellen ger rätt beskrivning av andra förlopp än det som använts för att bestämma den.

Den centrala utvärderingstekniken är passningsräkningarna. De har utförts huvudsakligen med hjälp av Junhua Dengs erfarenhet. Det finns emellertid formaliserade parameter-identifikationsrutiner som använts för likartat arbete, både äldre av t.ex. sekanttyp (Berzi m.fl. /36/) eller "modified line search" (Leiper och Cooper /37/), och sådana som bygger på helt nya algoritmer, se Holland /38/. Ju snabbare Dyna2D-beräkningarna blir desto värdefullare blir det att automatisera passningsräkningarna.

Tekniken för att bestämma brinnmodeller finns alltså tillgänglig för SveBeFo:s intressenter, vad de kan användas till har diskuterats i avsnitt 4.1 ovan. Vi kan hjälpa till med att överföra hela försöks- och utvärderingstekniken om så önskas. Alternativt kan vi utföra detta arbete, eller delar därav, som uppdrag.

Två moment kräver särskild utrustning eller kompetens, krökningsfrontsmätningarna och Dyna2D-beräkningarna. För krökningsfrontsmätningarna kan SveBeFo ställa upp med instruktör för användning av sprängtank och höghastighetskamera i samband med uthyrning av utrustningen.

Dyna2D programmet kostar i dag ca 40-50.000 kronor i inköp och ca 10.000 per år i underhållskostnad. För beräkningarna krävs endast en Pentiumbestyckad persondatorutrustning, men programmet är inte helt användarvänligt och skapandet av elementnätet kräver stor erfarenhet.

För organisationer som i dag inte använder FEM-beräkningar och snabbt vill lära sig tekniken torde därför det snabbaste sättet att nå resultat vara att i början låta SveBeFo, eller någon annan med erfarenhet, upprätta elementnäten men själv göra beräkningarna. Vartefter den egna erfarenheten växer så kan alla momenten göras i egen regi.

5 ERKÄNNANDEN

Författarna tackar alla deltagarna i projektgruppen och referensgruppen för detonik för deras bidrag till de resultat som presenteras i denna rapport. Personerna nämns i avsnitt 1.1: "Projektorganisation och målsättning". Ett särskilt tack för fackgranskning av rapporten riktas till Henrik Almström och Stefan Lamnevik.

6 REFERENSER

- 1 "Underlag till ramprogram för kollektiv forskning inom detonik och bergbrytnings-teknik - SveDeFo: 1990-1993". SveDeFo rapport DS 1990:5, 1990.
- 2 "Bergteknisk forskning - Ramprogram 1993-96". SveBeFo Rapport 1, 1993.
- 3 Persson, Per-Anders, Roger Holmberg och Jaimin Lee: *"Rock Blasting and Explosives Engineering"*. CRC Press, Boca Raton FL, 1994.
- 4 Kirby, I J och G A Leiper: *"A Small Divergent Detonation Theory for Intermolecular Explosives"*, Proc 8th Symp (Int) on Detonation, sid 176-186. Office Chief Naval Research, Arlington VA, 1987.
- 5 Hallquist, J O: *"User's Manual for DYNA2D: An Explicit Two-dimensional Hydrodynamic Finite Element Code with Interactive Rezoning"*. Lawrence Livermore Laboratory rapport UCID-18756, rev 2, Livermore CA, 1984.
- 6 M Cowperthwaite och W H Zwisler: *"Tiger Computer Program Documentation"*. Stanford Res Ins publikation Z106, Menlo Park CA, 1975.
- 7 Persson, Algot: *"Litteraturstudie: Hydrodynamiska ekvationer, brinnmodeller, tillståndsekvationer och parametrar för modellering av icke-ideala detonationer"*. SveDeFo rapport DU 1991:3, 1991.
- 8 Deng, Junhua: *"Dyna2D User's Manual (PC-version)"*. SveDeFo rapport DU 1991:9, 1991.
- 9 Nyberg, Ulf, Junhua Deng och Li Chen: *"Mätning av detonationshastighet och krökningsfront i samband med brinnmodellutveckling för emulsionssprängämne K1"*. SveBeFo Rapport 6, 1994.
- 10 Nie, Shulin, Junhua Deng, Ulf Nyberg och Algot Persson: *"Barriärprovsbestämning av ett emulsionssprängämnas minsta initieringstryck"*. SveBeFo Rapport 12, 1993.
- 11 Persson, Algot, Junhua Deng, Ulf Nyberg och Shulin Nie: *"Partikelhastighetsmätning i ett detonerande emulsionssprängämne"*. SveBeFo Rapport 9, 1994.
- 12 Nyberg, Ulf och Junhua Deng: *"Bestämning av Hugoniotparametrar för ett emulsionssprängämnas matris"*. SveBeFo Rapport 11, 1994.
- 13 Deng, Junhua, Shulin Nie och Li Chen: *"Determination of Burning Rate Parameters for an Emulsion Explosive"*. SveBeFo Report 17, 1995.
- 14 Mader, C L och C A Forest: *"Two-dimensional homogeneous and heterogeneous detonation wave propagation"*. Los Alamos Scientific Labs rapport LA-6259, Los Alamos NM, 1976.

- 15 Lee, E L och C M Tarver: *"Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives"*. Phys Fluids vol 23 no 12, sid 2362-2372, 1980.
- 16 Sheahan, R M och A M Minchinton: *"Non-ideal Explosive Performance Prediction Using the CPeX Model"*. Proc Explosives in Mining Workshop, sid 17-21, AusIMM, Parkville VIC, 1988.
- 17 Leiper, G A and D L Kennedy: *Application of Reactive Flow Analysis in Explosive Technology*", Proc 3:eme Symp Int Hautes Pressions Dynamiques, sid 163-170. Ass Fr Pyrotechnique, Paris 1989.
- 18 Leiper, G A och M P du Plessis: *"Describing Explosives in Blast Models"*. Proc 2nd Int Symp Rock Fragmentation by Blasting, sid 462-474. SEM, Bethel CT, 1987.
- 19 Lee, J: *"Detonation Shock Dynamics of Composite Energetic Materials"*. PhD avhandling, CETR New Mexico Inst Tech, Socorro NM, 1990.
- 20 Bdzil, J B, W Fickett och D S Stewart: Detonation Shock Dynamics: *"A New Approach to Modeling Multi-dimensional Detonation Waves"*. Proc 9th Symp (Int) on Detonation, sid 730-742. Office Chief Naval Research, Arlington VA, 1989.
- 21 Murphy, M J, E L Lee, A M Weston och A E Williams: *"Modeling Shock Initiation in Composition B"*, Lawrence Livermore Nat Labs rapport no UCRL-JC-111975, Livermore CA, 1993.
- 22 Marsh, S P (red): *"LASL Shock Hugoniot Data"*, Univ of California Press, Berkeley CA, 1980.
- 23 Ouchterlony, Finn: *"Review of Rock Blasting and Explosives Engineering Research at SveBeFo"*. Proc Explo'95 Conference, sid 133-146. ISEE och AusIMM, Parkville VIC, 1995.
- 24 Chan, S K: *"A Shock Sensitivity Model for Aerated Liquids"*. CIL Explosives Research Lab, Report No EL6810. McMasterville QU, 1976.
- 25 Voskoboinikov, I M, A N Afanasenkov och V M Bogomolov: *"Generalized Shock Adiatat for Organic Liquids"*. Combustion, Explosion and Shock Waves vol 3, sid 359-364, 1967.
- 26 Referensgrupp för detonik, protokoll från möte nr 3, 94-09-29.
- 27 Vutukuri, V S, R D Lama och S S Saluja: *"Handbook on Mechanical Properties of Rock"*, vol I-IV. Trans Tech Publications, Clausthal, 1974-78.
- 28 Touloukian, Y S, W R Judd och R F Roy (red): *"Physical Properties of Rocks and Minerals"*. CINDAS Data Series on Material Properties volume II-2, Hemisphere Publ Co, New York NY, 1989.

- 29 Dyskin, A V, L N Germanovich, K K Lee, L M Ring och A R Ingraffea: *"Modelling Crack Propagation in Compression"*. Proc 1st North American Rock Mechanics Symposium, sid 451-460. Balkema, Rotterdam 1994.
- 30 Song, J och K Kim: *"Numerical Simulation of the Blasting Induced Disturbed Rock Zone Using the Dynamic Lattice Network Model"*. Proc 2nd Intl Conf Mechs of Jointed and Faulted Rock, sid 755-761. Balkema, Rotterdam, 1995.
- 31 Minchinton, A: Personlig kommunikation, Kurri Kurri NSW, september 1995.
- 32 Potyondy, D O, R S Sarracino och P A Cundall: *"Modeling of Shock- and Gas-Driven Fractures by a Blast Using Bonded Assemblies of Spherical Particles"*. Manuskript till 5th Intl Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Montreal 1996.
- 33 Chiapetta, R F: *"PC-Blast, A Fully Integrated, Dynamically Linked PC Based Blast Model"*. Projektförslag till industrin, BAI Inc, Allentown, PA, september 1995.
- 34 Sarma, K S: *"Models for Assessing the Blasting Performance of Explosives"*. PhD avhandling, University of Queensland, Brisbane QL, 1994.
- 35 *"Mathcad, User's Guide Mathcad 6.0"*. MathSoft Inc, Cambridge MA, 1995.
- 36 Berzi, P, R Beccu och B Lundberg: *"Identification of a Percussive Drill Rod Joint from its Response to Stress Wave Loading"*. Int J Impact Engng. Under tryckning, 1996.
- 37 Leiper G A och J Cooper: *"Reaction Rates and the Charge Diameter Effect in Heterogeneous Explosives"*. Proc 9th Symp (Int) on Detonation, sid 94-102. Office Chief Naval Research, Arlington VA, 1989.
- 38 Holland, J H: *"Genetic Algorithms"*. Scientific American, sid 44-50, juli 1992.