

FOI-R--0360--SE Januari 2002 ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Siwert Eriksson

FAE- State of the Art



Vapen och skydd 147 25 Tumba

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Vapen och skydd 147 25 Tumba FOI-R--0360--SE Januari 2002 ISSN 1650-1942 Teknisk rapport

Siwert Eriksson

FAE- State of the Art

Utgivare	Rapportnummer, ISRN	Klassificering
Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI	FOI-R0360SE	Teknisk rapport
Vapen och skydd	Forskningsområde	
147 25 Tumba	5. Bekämpning	
	Månad, år	Projektnummer
	Januari 2002	E2911
	Verksamhetsgren	
	5. Uppdragsfinansierad v	erksamhet
	Delområde	
	53 Skydd och anläggning	steknik
Författare/redaktör	Projektledare	
Siwert Eriksson	Anders Carlberg	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbe	eteckning
	Tekniskt och/eller veter	iskapligt ansvarig
Rannortens titel		
FAE- State of the Art		
Nyckelord FAE, termobariska vapen		
ä		
Ovriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska/Engelsk	ka
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 110 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization	Report number, ISRN	Report type
FOI – Swedish Defence Research Agency	FOI-R0360SE	Technical report
Weapons and Protection	Research area code	· ·
SE-147 25 Tumba	5. Combat	
	Month year	Project no.
	January 2002	E2911
	Customers code	
	5. Commissioned Resear	rch
	Sub area code	
	53 Protection and Fortific	ation
Author/s (editor/s)	Project manager	
Siwert Eriksson	Anders Carlberg	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and techn	ically responsible
Report title (In translation)	1	
FAE - State of the art		
Abstract (not more than 200 words)		
Keywords		
FAE, thermobanc weapons		
Further bibliographic information	Language Swedish/En	glish
ISSN 1650-1942	Pages 110 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1	Inledning	2
2	Vad är FAE	3
	2.1 Tidigare FAE-vapen 2.1.1 Terrorism	4 6
	 2.2 Nyare FAE 2.2.1 Andra bränslen 2.2.2 Oxidator tillsätts 2.2.3 Initiering 2.2.4 Hybridladdningar 2.2.5 BLU-82 	7 7 8 8 8 8 9
3	Grundläggande fysik	10
	3.1 Detonation	10
	3.2 Deflagration	14
	<i>3.3 DDT</i>	16
	3.4 Kritisk diameter	18
4	Skydd	22
5	Fanneløps föredrag	23
6	Murrays föredrag #1	35
7	Murrays föredrag #2	60
8	Murrays föredrag #3	79
9	Några sammanfattande kommetarer	109
1(0 Referenser	110

1 Inledning

På uppdrag av HK KRI Plan Anlägg anordnade FOI (då FOA) ett internationellt seminarium på Täby Park Hotel 1999 08-31 – 09-01.

Seminar on FAE

Medarrangör var FBT (Forsvarets Bygningstjeneste) Norge.

Inbjudna föreläsare var
Dr Ingar Moen, Department of National Defence, Ottawa, Canada tidigare forskningschef vid Defence Research Establishment, Suffield, Canada
Dr Steve Murray, forskningschef vid Defence Research Establishment, Suffield, Canada
Prof Dag Bjerketvedt, Högskolan i Trondheim, Norge tidigare knuten till FBT
Prof emeritus Torstein K Fanneløp Tidigare bl.a. professor vid ETH, Zürich och forskningschef vid SAAB

Samordnare var

MSc Svein Christensen, FBT, Oslo, Norge Lab Siwert Eriksson, (då) FOI, Stockholm, Sverige (Ansvarig för denna sammanställning)

Denna rapport avser att ge den aktuella bilden av FAE (State of the Art) med seminariet som grund. Huvudinriktningen är vapnets verkan på fasta installationer/fortifikationer.

Fanneløps föredrag återges i sin helhet och Murrays diabilder var beskrivande och återges med endast några få kommentarer. Innehållet från övriga föredrag ingår till delar i den övriga textmassan.

2 Vad är FAE

Man kan säga att FAE är den militära tillämpningen av gas- och dammexplosion som länge varit problem inom många industrigrenar. Ett antal gasexplosioner med omfattande person- och egendomsskador har ägt rum vid raffinaderier, inom den kemiska processindustrin och i samband med transporter av brandfarliga ämnen. Och varje år sker allvarliga olyckor vid dammexplosioner. Många gruvarbetare har dödats eller skadats som resultat av koldammsexplosioner i gruvor. Liknande olyckor har skett inom livsmedelsindustrin vid hantering av spannmål, inom läkemedelsindustrin vid hantering av pulver och inom trävaruindustrin. När det gäller dammexplosioner påverkas både utspridningen och reaktiviteten av partikelstorleken – mindre partiklar utgör i regel ett större hot – och liksom när det gäller gasexplosioner är koncentrationen och initiering (både vad gäller effekt och energi) styrande på ett brandförlopps utveckling.

I detta sammanhang kan det också påpekas att en olycka som en gas- eller en dammexplosion naturligtvis också kan arrangeras av terrorister.

Från Nationalencyklopedien (1991) citeras:

FAE, eng. *fuel-air explosive*, ett bränsleluft-sprängmedel. En FAE-laddning kan förekomma bl.a. som flygbomb och verkar i huvudsak med den tryckvåg den genererar. När bomben briserar sprids bränsle ut och blandas med luften i sådana proportioner att blandningen blir explosiv och tänds till detonation. Inne i bränslemolnet blir trycket ca 2 MPa, men det avtar snabbt utanför molnet. Som bränsle används lättare kolväten i gas- eller aerosolform, men även t.ex. aluminiumpulver kan komma i fråga. FAEladdningar användes första gången under Vietnamkriget.

Beskrivningen ovan gäller det ursprungliga FAE-konceptet och det beskrivs i detalj i Murrays 1.a föredrag.

En utveckling har skett och man brukar tala om olika generationers FAE-vapen. Numera finns också hybrider och som vi ska se kan man numera åstadkomma avsevärt högre tryck än 2 MPa. För att förstå mekanismen kommer grundläggande fysik att genomgås kortfattat.

Skillnaden mellan ett konventionellt sprängämne och FAE beror på energitätheten. Energitätheten, definierad som J/kg, är större hos FAE-bränslet än hos sprängämnet. Men jämför man energitätheten definierad som J/m³, dvs i FAE-fallet räknat på molnvolymen, blir rangordningen den omvända, se Fig. 2.1. Detta har till följd att ett kompakt sprängämne nära laddningsytan ger ett mycket högre tryck (p_s ca 50 MPa) än en energimässigt lika kraftig FAE-laddningen ger inne i molnet (ca 2 MPa).

bränsle	MJ/kg	MJ/liter detonerbar laddning
propan	50	0.003
TNT	5	8
Al	30	

<u>Fig. 2.1</u> FAE kan kallas volymladdning eftersom energitätheten i det detonerbara molnet är låg. Ungefärliga siffror.

2.1 Tidigare FAE-vapen

FAE-bomber användes i krig första gången i Vietnam. Enligt de första rapporterna var vapnet mycket effektivt och användes för att säkra landningsplatser för helikoptrar genom att oskadliggöra fiendesoldater, utlösa minor och avlöva terrängen. Som vanligt i sammanhanget var de första öppna rapporterna präglade mer av tillverkarnas synpunkter/önskemål än av objektiva fakta.

Fig. 2.2 ger data om öppna amerikanska bomber.

U.S. Fuel-	Air Explosives	
<u>BLU-73</u>	FAE I	
<u>BLU-95</u>	500-lb (FAE-II)	
<u>BLU-96</u>	2,000-lb (FAE-II)	
<u>CBU-55</u>	FAE I	FAE STREET
<u>CBU-72</u>	FAE I	THE WEARCH
		CBU-72

<u>Fig. 2.2</u> Lista över amerikanska FAE-bomber och bild av en kanister. Från Federation of American Scientist's (FAS) hemsida, <u>www.fas.org/.</u>

På andra hemsidor, t.ex <u>www.janes.com</u> och <u>www.milparade.com</u>, kan man få uppgifter om vapen från andra länder, t.ex. från Ryssland och Kina.

Men hur effektiva är dessa FAE-vapen?

Från pressen (Int Herald Tribune 2001-09-19) kan vi citera:

"The U.S. military developed several types of air-fuel bombs to clear minefields and burn enemy materiel. The CBU- 72 weighed 500 pounds." After falling from a plane, it separated into three submunitions, which broke apart about 30 feet (9 meters) above the target, creating a fuel cloud some 60 feet wide and 8 feet thick before a detonator turned it into a huge fireball."

och (samma artikel):

"During the Gulf War, in 1991, the Marines dropped 254 of the bombs on minefields and Iraqi soldiers in trenches. While it set off a few mines, the bomb was "primarily useful as a psychological weapon," according to the Federation of American Scientists, a private group in Washington."

Notera här uttrycken:

<u>a few mines</u>, som kan tolkas som att vapnet inte är speciellt verksamt mot minor.

<u>psychlogical weapon</u>, som kan tolkas som att vapnet inte är speciellt verksamt.

Den första punkten styrks även av svenska försök på 70-talet (med etylenoxid): endast få minor påverkades.

Det begränsade trycket medför också att en FAE-laddning av ovanstående slag inte utgör något allvarligt hot mot täckning och barriärer till en svensk fortifikatorisk anläggning. Om väl FAE-bränsle kommit in i en anläggning kan emellertid resultat bli katastrofalt som Fig. 2.3 visar.



Fig. 2.3 FAE-bränsle som kommit in i en fortifikatorisk anläggning kan ge förödande resultat även om det inte detonerar utan endast brinner. (Jfr. med s.k. gasexplosion i lägenhet där ett snabbt brandförlopp leder till att rummet exploderar.) Bild från försök i Älvdalen där bränslet tändes utanför en anläggning men där reaktionen fortplantades genom ingångsdelen. Man ser att hela täckningen lyft. Hitintills har man, av ovanstående anledningar, mest varit fokuserad på att hindra inträngning av bränsle i fortifikatoriska anläggningar, inträngning via hålgörning i täckning eller via inluftkanaler. Det senare hotet kan ju, som bekant, ellimineras med hjälp av styrd ventilation och/eller med hjälp av destruktion av bränslet utanför anläggningen (Aktivt skydd) samt genom bevakning mot sabotage.

När det gäller utformningen av s.k. aktivt skydd är det väsentligt att man har den fysikaliska (och kemiska) bilden klar för sig. Detta gäller inte bara nya FAE-liknande effekter utan även det äldre hotet. Som exempel på detta ger vi följande stiliserade exempel:

- Tänk en tunnel fylld med gas-luft blandning inom explosionsgränserna, Fig.
 2.4. (Vi bortser från hur bränslet kommit på plats.)
- Tänk att gasen tänds i något punkt.
- Var och hur ska man tända för att få högst tryck i slutet av tunneln?

explosiv gasblandning i tunnel

<u>Fig. 2.4</u> Var/hur ska man tända för att få så högt tryck som möjligt vid tunnelns botten?

Svaret är inte entydigt men risken är mycket stor att man får det <u>högsta trycket</u> i slutet av tunneln om man <u>tänder i mynningen med låga</u> (svag initiering). Lågan startar ett brandförlopp (deflagration) som ger förkompression (tryckökning) framför flamman. Det är känt att om man får övergång till detonation (DDT) kan trycket bli större än om blandningen direkt tänts till detonation. (Stark initiering med sprängämne.)

Möjligheterna till DDT diskuteras i Mom 5 och i Murray 3.e föredrag ges exempel.

2.1.1 <u>Terrorism</u>

Ingen har rapporterat att terrorister använt FAE-konceptet. men från Int Herald Tribune 2001-09-19 citerar vi:

"Algerian guerrillas tried an elaborate plot over the winter holiday season in 1994, seeking to turn a commercial jet into a fuel bomb. After hijacking an Air France Airbus A300 in Algiers, the guerrillas flew to Marseilles and demanded about three times as much fuel as it would take to get to Paris, their professed destination....The French authorities "put two and two together," said F. Robert van der Linden, an aviation curator at the Smithsonian's National Air and Space Museum, and stormed the jet, killing the terrorists. The French found 20 sticks of dynamite ready to blow the plane apart in what the interior minister at the time, Charles Pasqua, called a "suicide operation over Paris."

Egentligen var ovanstående inget försök att skapa en FAE-bomb eftersom resultatet endast kunde ha blivit en (våldsam) brand, jfr händelsen vid WTC 11 september. För att få en explosion behövs en bättre blandning bränsle-luft än vad som kan åstadkommas genom att (på något sätt) bara släppa ut bränslet.

2.2 Nyare FAE

Av Murrays andra föredrag framgår att försök på senare tid har gjorts i Canada att förbättra FAE-laddningars verkan, bl.a. genom att öka trycket, "enhanced weapons".



Vi citerar den kanadensiska skriften For Soldiers by Soldiers:

"The first generation of blast weapons was introduced in the late 1960's. Modern blast weapons are more portable and effective and are becoming widely available on the world market. Technological advances in explosives have resulted in the development of a more effective class of blast weapon systems, titled "thermobaric weapons" or "enhanced blast weapons." Such weapons have been employed in Afghanistan, Bosnia and Chechnya. Blast weapons are a potential threat to the Canadian Forces (CF) as it conducts combat operations, Peace Support Operations (PSO) or Operations Other Than War (OOTW) around the world. Much of the information about these weapons had been classified as SECRET until recently. However, the proliferation of blast weapons demands that Canadian soldiers be informed of their capabilities and the means to defend against them or reduce their potential effects."

Notera namnet "<u>thermobaric weapon</u>" (förkortningen FAE används inte), det är nu inte längre fråga om vad man brukar kalla 1.a generationens FAE utan det är en utveckling och ledet "thermo" visar på att man nu utnyttjar uppkomna värmeeffekter.

Det finns flera sätt att påverka trycknivån.

2.2.1 Andra bränslen

Att söka nya bränslen inom FAE-konceptet ger endast marginella ändringar. Enkla kemikunskaper gör det möjligt att uppskatta trycket vid godtycklig blandning utan att man behöver tänka på om blandningen går att detonera eller inte. Blandningar som studerats är inblandning av aluminium i propan-luft, se Fig 2.5, TNT-damm i luft m.fl. Beräkningarna visar att trycket påverkas men endast marginellt. I Murrays föredrag visas också några resultat.



<u>Fig. 2.5</u> Beräknat resulterande tryck vid detonation av 4 % propan i luft och då propangasen succesivt ersätts med likvärdig mängd aluminium. (Efter S Lamnevik FOI)

2.2.2 Oxidator tillsätts

Länge har man känt till att en gas- eller dammdetonation ger högre tryck om den sker i syrgas än om den sker i vanlig luft. Ökningen är beroende på bränslet men den rör sig i regel om en ungefärlig faktor 2. I Fig. 2.6 ges några exempel.

gas	i luft	i syrgas
propan	17.3	35.2
eten	17.7	32.5
acetylen	16.1	28.6
vätgas	14.6	17.9

Fig. 2.6 Vid detonation i syrgas får man högre tryck än vid detonation i luft.

FAE aktuella bränslen ger betydligt (ca tre gånger) större energiutbyte än konventionella sprängämnen räknat på massan. Skall syrgas (eller annan oxidator) ingå i laddningen förlorar man FAE-ladningens viktsmässiga fördel och strikt har man heller inte längre någon F<u>A</u>E-laddning. Syrgas har väl heller inte varit aktuellt för inblandning men försök har gjorts med andra ämnen som socker och ammoniumnitrat. Det senare, AN, kan ju användas som sprängämne och är överbalanserat på syre varför även andra ämnen kan ingå.

2.2.3 Initiering

Vid detonation av en konventionell FAE-laddning stiger trycket till ca 2 MPa dvs i normalfallet med en faktor 20. Har luften, t.ex. i en ingångsdel, av någon anledning förkomprimerats till trycket p blir resulterande detonationstryck i princip 20·p. Ett sätt att i en tunnel skapa en betydande förkomprimering är att i tunnelmynningen starta en deflagration, en brand, i bränsleblandningen, dvs initieringen ändras. Denna teknik beskrivs i Murrays 3.e föreläsning.

2.2.4 Hybridladdningar

Genom att komponera bränslet som en blandning av, t.ex., partiklar och vätska kan man få en laddning som kastar ut partiklar. Är partiklarna reaktiva, t.ex. aluminiumpulver eller TNT, kan man skapa ett förlängt reaktionsförlopp där partiklarna ger sitt reaktionstillskott i ett senare skede, jfr. Mom. 2.2.3. Verkan blir här också tydligt termisk, man kan säga att vapnet ger en "brandvägg" som slår mot målet. Även denna teknik beskrivs i Murrays 3. föreläsning.

2.2.5 <u>BLU-82</u>

Ett exempel på hybridladdning som fått smeknamnet Commando Vault (i Vietnam) eller Daisy Cutter (i Afganistan) ingår i vapensystemet BLU-82B/C-130. I TVsändningar från CNN har bomben (på 6.8 ton) kallats FAE-bomb vilket inte är helt korrekt, men i programmet visades en försöksfällning där man tydligt såg en molnbildning före detonationen.

Enligt uppgift (FAS) består laddningen på 5.7 ton av en

slurry av ammoniumnitrat, aluminiumpulver och polystyren

Enligt uppslagsverk är polystyren en spröd plast och även de övriga ingredienserna är fasta ämnen, men en slurry är en lösning, en "gegga". För att det hela ska gå ihop måste fler ämnen ingå. Eftersom polystyren (en polymer av styren C_8H_8) är lösligt i många flytande kolväten är det troligt att slurryn tillverkats med hjälp av något sådant. I så fall skulle man ha en hybridladdning.

Enligt uppgift ger laddningen, som utlöses 1 m ovanför marken, ett tryck på 7 MPa nära nollpunkten. Denna trycknivå är låg i jämförelse med konventionella bombers. Under Desert Storm användes 11 st BLU-82, alla fällda från Hercules.

3 Grundläggande fysik

3.1 Detonation

Detonation är en komplicerad process och endast en starkt förenklad bild kan ges här. Mekanismen är att en <u>stötvåg</u> komprimerar mediet. Den höjda temperaturen startar reaktionen, se Fig. 3.1,. och reaktionshastighetens är temperaturberoende (Arrhenius lag), se Fig. 3.2.



<u>Fig. 3.1</u> Principen för detonation. Detonationsvågens front är en stötvåg som komprimerar blandningen. (Jfr. markerade cirklar.) Ökningen av temperaturen startar reaktionen som är komplett ett stycke bakom fronten i det s.k. CJ-planet. För ideal detonation är D = u + c, dvs CJ-planet rör sig med samma hastighet som fronten. Se även Fig. 3.2.



Fig.3.2Omedelbart bakom detonationsvågens front, Fig. 3.1, har man oreageratbränsle med förhöjd temperatur, induktion. Reaktionstiden, τ_r , är kort i förhållande tillinduktionstiden τ_i . Förhållandet τ_{r/τ_i} är av storleksordningen 10⁻⁵. Induktionszonenslängd ges i Fig. 3.14 för några olika bränslen.

Omedelbart bakom stötvågsfronten har man ingen märkbar reaktion, men eftersom reaktionshastigheten (när den väl startat) växer exponentiellt har efter en kort

stund/sträcka allt reagerat. Man är då framme vid det s.k. CJ-planet. (Uppkallat efter Chapman och Jouget.)

Förloppet kan också beskrivas i ett p-v-diagram. För en gas gäller enkelt samband mellan tryck, p, och specifik volym, $v = 1/\rho$. (ρ är densiteten.) Kurvan ger möjliga förändringar över (t.ex.) en stötvåg. (Med $x = v/v_o$ och $y = p/p_o$ har kurvan formen

 $y = \frac{(\gamma + 1) - (\gamma - 1)x}{(\gamma + 1)x - (\gamma - 1)}$) Tillförs gasen energi, t ex genom att den reagerar, får man ett

annat samband, en annan kurva, se Fig. 3.3. (I ekvationen ovan tillkommer en positiv term i täljaren.)



Fig. 3.3q = 0 svarar mot möjliga förändringar utan energitillförsel. Viddetonation stiger trycket från utgångspunkten till en punkt med trycket $p_{vN.}$ Reaktionen startar och sluttrycket i CJ-planet är p_{CJ} . Förändringarna sker idiagrammet efter en rät linje som är tangent till aktuell kurva. Den förstatrycktoppen, p_{vN} , är mycket kortvarig och kallas von Neumann-spiken.

I själva verket finns det emellertid ingen plan detonationsfront utan detonation är alltid ett tredimensionellt förlopp med både longitudinella och transversella fronter, se Fig. 3.4. På en sotad plan skiva, parallell med utbredningsriktningen, får man ett (tvådimensionellt) avtryck som visar på en <u>cellstruktur</u>.



<u>Fig. 3.4</u> Detonationsförloppet är alltid tredimensionellt med longitudinella och transversella stötvågsfronter. Trippelpunkterna ger avtryck på sotad yta.

Inom cellen varierar fronthastigheterna, se Fig. 3.5. Cellens storlek är beroende bl. a. av bränsle och koncentration men är i regel mindre än 1 dm, se Fig. 3.14. Eftersom det råder ett entydigt samband mellan stötvågens hastighet och frontens tryck kommer alltså fronttrycket, p_{vN} , att variera kraftigt över en mycket kort sträcka. Detta ger förklaringen till att man inne i ett FAE-moln kan registrera vitt skilda tryck även i närbelägna punkter, se de tre registreringarna i Fig. 3.6.



<u>Fig. 3.5</u>. Inom cellen variera fronthastigheten inom vida gränser, i detta exempel mellan 1.1 km/s och 2 km/s, medan CJ-värdet är ca 1.4 km/s. Detta betyder att även fronttrycket varierar och eftersom trycket är proportionellt mot hastigheten i kvadrat blir denna variation ännu större.

För att direkt starta en detonation behövs en stark initiering i form av ett sprängämne. Avgörande är initieringsladdningens

energi, effekt och volym.

Det senare betyder att initieringsladdningen måste ha en viss minsta utsträckning. I Fig. 3.7 ges nödvändig tändenergi för några kolväten.

Mera detaljer ges i Murrays 1.a föredrag. Metan har i Fig. 3.7 tagits med av historiska skäl. Tidigare ansåg man att en metan-blandning i luft inte kunde detonera. Men med en initieringsladdning på ca 20 kg går det alltså.



<u>Fig. 3.6</u> Fortsättning nästa sida.



<u>Fig. 3.6</u> Tre registreringar (se föregående sida) från närbelägna punkter i samma försök. (Belastning av RC 90) Notera den stora skillnaden i maximitryck. Efter en kort tid, mindre än en halv ms, är trycket det för det använda bränslet normala CJ-trycket. (ca 2 MPa. Fronttrycken i de tre fallen varierar mellan 3.5 till 13 MPa vilket med häsyn till cellstrukturen är helt normalt.



<u>Fig. 3.7</u> Minsta tändenergi, uttryckt i kg sprängämne, för att direkt starta en detonation som funktion av blandningsförhållandet bränsle/luft där "1" står för stökiometrisk blandning.

3.2 Deflagration

För att starta en deflagration krävs endast en svag initiering, mindre än 1 mJ, av typen låga eller gnista. Fig. 3.8 ger några data.

Vid deflagration sker reaktionen över en <u>flamma</u>, som med typiskt låg hastighet fortplantar sig genom blandningen. Samma p-v-diagram som användes för att åskådliggöra detonation, Fig. 3.3, kan användas här men skalan måste ändras till låga tryck, se Fig. 3.9. Detta samband gäller dock endast för s.k. laminär flamma, ett tillstånd som är mycket sällsynt.

Volymökningen, se Fig. 3.9, ger strömning ut från förbränningen och om förbränningen sker i tunnel får man på så sätt en mycket märkbar förkomprimering. I öppen geometri gör expansionen att förkomprimeringen inte blir lika markant.

Sker förbränningen i slutet rum leder förbränningen till en avsevärd tryckökning – volymen är ju låst. Gränsfallet är den teoretiska volymetiska explosionen med sluttryck rakt ovanför utgångspunkten i Fig. 3.9 eller Fig. 3.3. Detta medför att bränsle som på något sätt kommer in i en anläggning utgör ett stort hot.



<u>Fig. 3.8</u> Minsta tändenergin för några kolväten som funktion av blandningsförhållandet. Den undre delen av figuren är sammansatt av tre delar.



<u>Fig. 3.9</u> Pilen visar möjlig lösning vid deflagration och laminär flamma. Linjens lutning (som måste vara åt vänster) är ett direkt mått på förloppets (flammans) hastighet som är låg jämfört med detonationshastigheten. Notera den avsevärda volymökningen.

Som nämnts är betraktelsesättet ovan av intresse endast i ren geometri. I reell geometri kommer hinder att ge ett mycket mer komplicerat förlopp.

3.3 DDT

Avsnittet är skrivet för gas-luft blandning men gäller i huvudsak även fasta ämnen och blandning damm-luft.

Som framgått av Mom. 3.1 och 3.2 kan en blandning mellan en reaktiv gas och luft vid initiering reagera på två sätt: deflagrera eller detonera.

Ett förlopp som startat som brand kan, om omständigheterna är lämpliga, slå över till detonation. Detta kallas DDT (Deflagration to Detonation Transition). Några omständigheter som möjliggör detta är:

Hinder som ger turbulens. Större mängd blandning. (Lång "accelerationssträcka".) Förkomprimering. (Den stora volymökningen ger upphov till en tryckvåg framför flamman, se Mom. 3.3.) m.m

En laminär flamma är, som sagts, sällsynt. Utbredningen blir lätt turbulent.

Några bilder från försök visar detta. Fig. 3.10 ger fotografier från försök i liten skala med gasblandning som tänts till deflagration i ett rör med utlagda cylindriska hinder. I

Fig. 3.11 ges en renodlad bild av förloppet. Notera att förbränningen genererat strömning och turbulens framför flamman. Fig. 3.12 ger en bild av liknande försöksuppställning i större skala.



<u>Fig. 3.10</u> Försök i liten modell med hinder. Två tidpunkter

- Flammfronten kommer in från höger
- Förkompressionen har givit upphov till virvlar vid hindren.



Fig. 3.11 Renodlad bild av Fig. 3.10.



Fig. 3.12 Försöksuppställning i större skala.

Hur lätt en deflagration slår över till detonation är också beroende av bränslet men allmänt gäller att varje geometri där turbulenta fickor kan uppstå lätt ger upphov till DDT:

3.4 Kritisk diameter

I Mom. 3.1 visades att detonationen är ett tredimensionellt förlopp med cellstruktur. Liksom cellens storlek är en karaktäristisk parameter för blandningen är också den "kritiska diametern".

Med kritisk diameter menas minsta diametern på ett runt rör genom vilket en detonation kan fortplantas ut i det fria. Storheten bestäms med GO-NO GO försök i utrustning som i Fig. 3.13.



Detonerbar blandning i och utanför röret

<u>Fig. 3.13</u> En detonation i ett rör når mynningen. Har röret stor diameter fortsätter detonation utanför röret, har det liten diameter släcks detonationen. Kritiska diametern är gränsfallet.

I Fig. 3.14 ges några värden

Bränsle	Induktions-	Cellstorlek	Kritisk	
	zonens längd	mm	diameter m	
	mm			
	0.27	9.8	0.15	
acetylen				
vätgas	0.23	15	0.2	
etylen	2.56	28	0.43	
etan	4.55	54-62	0.9	
propylen		52		
propan	4.1	69	0.9	
n-butan		50-62	0.9	
vätesulfid	5.0	90-130		
metan	23.5	250-310		

<u>Fig. 3.14</u> Kritisk diameter, cellstorlek och induktionszonens längd för några kolväten.

En fråga som tidigt väcktes var om snabbventiler kunde stoppa en detonation. Detonationsfrontens hastighet ligger ju kring 2 km/s och stängningstiden hos en snabbventil är av storleksordningen några ms. Ventilen hinner alltså inte stänga förrän förloppet fortplantat sig genom öppningen. Men är öppningen tillräckligt liten för att detonationen skall självdö? (Man har alltså förutsatt att bränsleblandningen redan dragits in i anläggningen men att initiering till detonation skett utanför snabbventilen.)

Försök av typen GO-NO GO genomfördes för några olika uppställningar, se Fig. 3.15 -.19.

Resultaten är inte entydiga. Även om detonationen släcktes kunde tillräckligt mycket heta reaktionsprodukter hinna passera ventilen under stängningstiden för att man skulle få en återtändning till brand bakom ventilen.

Liknande erfarenheter gjordes i Älvdalen vid försök med stenfilter. Även här fick man (vid små filterstenar) en utsläckning men en senare återtändning bakom filtret. (Fig. 2.3 visar resultatet.)



<u>Fig. 3.15</u> Försöksuppställning med svensk snabbventil med detonerbar blandning på båda sidor om ventilen och som tänds till detonation framför ventilen. Eftersom areaändringar påverkar detonationens fortplantning och ev. DDT testades några olika uppställningar.

			GO			NO GO	
configuration*	Fuel	% fuel	¢	d _c /d _o	% fuel	φ	d_c/d_o
T-BV-UN	C_2H_4	6.6	1.01	1.2	6.2	0.94	1.43
-"-	C_2H_2	5.8	0.73	0.89	5.4	0.68	1.14
W-BV-UN	C_2H_2	5.7	0.72	0.94	5.3	0.66	1.26
T-BV-T	C_2H_4	6.0	0.91	1.49			
**	C_2H_2	5.8	0.73	0.89			
W-BV-T	C_2H_4	6.2	0.94	1.43			
"	C_2H_2	6.1	0.77	0.77			

* Hänvisar till försöksuppställningen. T-BV-UN anger ordningen Tube-BlastValve-Unconfined. W står för vägg

Fig. 3.16 Försöksresultat

4 Skydd

Många former av skydd mot verkan av FAE har diskuterats och diskuterades vid seminariet. När det gäller hårdgjorda konstruktioner som t.ex. ledningscentraler i berg är inluftskanaler svaga punkter. Allmänna regler är svåra att formulera och kan lätt misstolkas och skyddsåtgärderna måste skräddarsys annars kan ont bli värre. Men de åtgärder som tycks vara verkningsfulla är en kombination av

- 1) detektering
- 2) ventilationsstopp
- 3) avsiktlig antändning (spark curtains)
- 4) vattenbegjutning
- 5) gitter och filter



En av de anläggningar som diskuterades i grupparbete vid seminariet visas i Fig. 4.1.

<u>Fig. 4.1</u> Diskussionsunderlag.

För det första slog man fast att endast inluftskanalen behövde speciellt FAE-skydd. (Inga uppgifter gavs om vad konstruktionen kunde tänkas tåla, dvs om dimensionerande last.) Skyddet borde, menade man, bestå av ett automatstopp som på indikation stänger av ventilationen så att bränsle inte dras ner i schacktet. Om inte ventilationen kan stängas ens för någon minut ansåg man att ett aktivt skydd i form av kraftiga gnistor i ingångsdelen (upptill, dvs t.h i bild) i kombination med sprinklersystem längre ner skulle kunna ge skydd.

5 Fanneløps föredrag

FOA SEMINAR ON FUEL AIR EXPLOSIONS 1999

Lecture on Heavy -Gas Dispersion Torstein K. Fanneløp

The introductory notes enclosed on Release and Dispersion of Heavy Gases were written in 1990 for a Seminar on Insurance Risks. It was attended by executives concerned with industrial accidents caused by spills of hazardous fluids. The fundamentals of release and spreading in the atmosphere have not changed, and the only model discussed (i.e. the radial box model) is still relevant for F AE releases.

The considerable research efforts of the last ten years, are summarized in a recent publication by Rex Britter (1998) sponsored by the European Commission. Readers interested in a wider scope of industrial safety and environmental problems, could benefit from my own book (Fannelop, 1994). Many related problems of density-driven flows are discussed in John Simpson's book (1997) on gravity currents.

Additional references:

- Britter, R.E. (1998) Recent research on the dispersion of hazardous materials. EUR 18198 EN
- Fannelop, T.K. (1994) Fluid mechanics for industrial safety and environmental protection. Elsevier.
- Simpson, J.E. (1997) Gravity currents in the environment and the laboratory. Second ed.: Cambridge University Press.

Flammable, explosive or toxic substances, which upon release produce gases heavier than air, are used in large quantities in the chemical and energy-related industries. The gas released could be heavier than air simply because it has a higher molecular weight or because it is cold or laden with particles or droplets. The gas will generally be mixed with air and this mixture of gas and air will be referred to as a gas cloud. The volume of such clouds can range from a few cubic meters near the release point for a small spill, to tens of cubic kilometers for large-scale highly diluted spills. When the concentration is high, of the order of a few per cent, the motion of the cloud is determined by gravity except in strong wind. A heavy gas release which represents a fire hazard, will therefore have to be analyzed by methods which take account of gravity effects. As the cloud mixes further with air, well below the lower flammable limit (LFL), the prime concern will be toxicity or other noxious effects which -persist into the PPM-regime. The highly diluted cloud just drifts with the wind, and its ultimate fate is determined by the motions in the atmosphere. An example is the spreading and deposition of radioactive particles from atomic explosions; a problem which has occupied meteorologists long before the incident at Chernobyl.

The present-day concern with heavy gas clouds can be traced to the controversy surrounding the proposed large-scale importation of liquefied natural gas (LNG) to the US during the energy crisis in the early Seventies. Various scenarios were proposed where an accidental spill of LNG on land or water would spread out as a liquid layer, evaporate and form a heavy (cold) and highly flammable cloud twelve hundred times the original liquid volume at a dilution corresponding to the lower flammable limit (5% for methane). The cloud would moreover be very stable (it has the heaviest layer below, is thus "stably stratified"), and it could drift with the wind over long distances (Fig.1). The US Coast Guard sponsored several investigations of the "maximum hazardous distance for a standard 25,000 m3 spill". The results showed large discrepancies; from less than 2 km (predicted by scientists from oil companles) to nearly 100 km (sc1entists from MIT) .But the result depends on the definition of "a non-hazardous cloud" .One party used "average concentration less than LFL", the other "concentration everywhere less than LFL". These differences account for some of the discrepancy, but the incomplete understanding of the motion and mixing of heavy gas clouds was the main reason for the disagreement. Some well publicized accidents (e.g. Flixborough, 1974) added fuel to the fire, and research programs with substantial funding were soon underway in the US (Dep't of Energy) as well as in Europe (Shell Oil Co., Thorney Island international project). These programs dealt mainly with the early (gravitational) phase shortly after release, and the release conditions were often idealized to make the interpretation easier and to aid in the development of prediction models. At present more than one hundred prediction methods have been published. Most are unvalidated and represent only slight variations on a common theme; the socalled "box model". A few are available also in the form of computer graphics with hazardous areas nicely displayed in vivid colour.

One would be well adviced not to rely too heavily on such programs without expert counsel. The idealized release conditions assumed in the programs are rarely met in practice. A few of the many possible releases leading to a heavy gas cloud are illustrated in Figure 2,(Reproduced from Britter,1989).

Most of the known accidents involving heavy gas clouds have been described by Lees (1980). The more recent accidents, such as Bhopal (1984) and Ufa, Ural (1989) will be known from the news reports. Sometimes nature, rather than industry, is to blame. The CO2-cloud which killed nearly two thousand people in Cameroon in 1986, is believed to be of volcanic origin. As a result of the many accidents and the adverse publicity, the Commissioners of the European Community have declared heavy gas clouds a "major technological hazard" with legal as well as practical consequences. The list of hazardous materials is growing rapidly.

It may seem strange that the force of gravity, which acts downwards, should be responsible for spreading the heavy gas outwards. But the phenomenon is really familiar. Consider a liquid filled container resting on a flat surface or floating in water, (Figure 3).Gravity creates pressure on the side walls and when these are suddenly removed, the fluid flows outwards. The pressure exerted by a heavy gas is much smaller, but the spreading process is analogous as are the spreading of oil on water, of sandstorms in Sahara and of fresh (or warm) water on the ocean surface,(Simpson,1987).It follows that the spreading, due to gravity, ceases if the gas is trapped in a hollow. The gradual trapping of gas on an uneven surface (such as a grass field),limits in many cases the hazardous range, but this effect is usually not included in the prediction models offered to the users. A large scale example of the effects of topography on heavy gas spreading, is the unpleasant winter fog covering Swiss valleys in winter. This "cloud" is only slightly heavier than air, but it displays many of the characteristics found in the heavy-gas cloud experiments undertaken at ETH (Ref: Video 1 recording of ETH-experiments).

The simple notion of the spreading process illustrated in Fig 4, has led to the simple spreading model known as the "box model". A cloud in the shape of the initial container (cylindrical box), is prescribed to maintain this geometric shape throughout the spreading process. The spreading velocity at the front is assumed to be proportional to the hydrostatic

pressure under the cloud, it will diminish with time as the cloud height becomes smaller and the radius larger. (In the absence of mixing, the cloud volume $\pi R^2 H$ will be constant, equal to the initial volume.) In the case of water, we know that the velocity associated with the hydrostatic pressure of depth H is equal to $u = (2gH)^{\frac{1}{2}}$ (Torricelli's Law). There is an approximation implicit in this formula, known to all engineers from the freshman mechanics course; the density of air is assumed negligible in comparison with that of water. The correction is important when we deal with heavy gas rather than water, and the corrected formula for the outflow velocity is:

$$u_{f} = [(\rho_{g} - \rho_{a}) 2gH) / \rho_{g}]^{1/2}$$

As indicated by the index, the velocity of the cloud front is assumed to be equal to this outflow velocity. An empirical value k (replacing the factor 2) is often used, but the simpleminded formula is kept. Generally, gravity spreading is said to be more important than the wind effects as long as the wind velocity, usually measured at 10 m

height, is of the same order or smaller than u_f (The actual wind at a height equal to the cloud height, will for small clouds be much below the nominal.wind speed.) Based on the known frontal velocity and cloud volume (no mixing),the cloud radius and height as function of time, can easily be calculated. The mixing can be incorporated a posteriori by assuming certain entrainment rates, i.e. the rate of inflow of air through the top surface or through the side edge area. Both are assumed to be proportional to the front velocity:

 $v_e = \alpha_t \; u_f \; \text{ and } v_e = \alpha_f \; u_f$

where α_t and α_f are the empirical entrainment coefficients for top and side entrainment respectively. By multiplying v_e by the surface area and time, the volume of air flowing into the cloud can be determined and thereby also the concentration.

For simple formulations of α_t and α_f , (e.g. constant values), the calculations can be handled analytically, otherwise the analyses can be programmed easily *for* a step-by-step procedure on a pocket computer.

The question remains: How valid are the results? The Thorney Island field experiments were designed to test prediction models in general, and the box model in particular, a fact evident from the initial configuration (right circular cylinder). It was noted by critics, already prior to these field trials, that this configuration would not produce the outward flow postulated by the model (Fig 4) but a downward-outward flow resulting in a strong front vortex, (Fig 5). The happy fact that the front arrival time used in the box model, agreed well with the experimental values, led many method developers to the erroneous conclusion that the model was right. (It seems that all models which are based on energy conservation in one form or another, produce the "right" frontal velocity). An attempt to model the flow in agreement with the observed flow phenomena (including the vortex front), has been presented by Fannelop and Zumsteg (1984). The importance of modeling this initial motion correctly can be illustrated by the fact that the Thorney Island experiments showed the concentration to be reduced from the initial 100% to about 5% in this early process. A potential user of an existing method is well advised to check that the initial release process is modeled correctly in the method of interest. For the further spreading, many of the box models available produce satisfactory results in the absence of such effects as heat transfer, obstacles or surface traps. The box model predicts only the average concentration and not the local concentration within a cloud. Large clouds could have substantial flammable regions even when the average value is below LFL. This is illustrated in Figure 6 for an assumed linear variation.

Our recent research at ETH has considered mainly cold clouds as a complement to the isothermal cloud experiments elsewhere. As shown in the videorecording, we generate the cold cloud by evaporating liquefied nitrogen on water at one end of a long spreading channel. The water content and cloud temperature have been determined by means of five gas samplers and nearly 50 thermocouples. The low humidity in the laboratory and the low rates of entrainment for this very stable flow, allowed us to determine the gas concentration from the temperature distribution. Some sample distributions are shown in Figure 7. It is clear that large variations in concentration exist, not predictable by a box model approach. A , surprising result is

that the longevity of this cloud emanating from a cryogenic spill, is determined by the heat transfer from below, and not from the entrainment of air. The development of new prediction models which take into account this finding, is now underway.

REFERENCES.	
Britter,R.E. (1989),	Atmospheric dispersion of dense gases, Ann.Rev.Fluid Mech21,317-44
Lees,F.P. (1980)	Loss Prevention in the Process Industries, Vol.1 and 2. Butterworths
Simpson,J.E. (1987)	Gravity Currents in the Environment and the Laboratory, Ellis Horwood Ltd
Fannelop,T.K. andZumsteg,F (1984)	Special problems in heavy gas dispersionin, Heavy Gas, and Risk Asessment (S.Hartwig,Ed.),D.Reidel Publ.Co.



Figure 1. LNG - Spill scenario



.

HIGH VELOCITY FRAGMENTING JET FROM REFRIGERATED Containment





Figure 3. Hydrostatic pressure differences give rise to gravity spreading



Figure 4 a. The box model at various times $t = t_i$ Horizontal motion only, no mixing



Figure 4 b. Box model with " top entrainment "



Gas in motion (downward - outward)




Figure 6. Schematic of flammable cloud

Averaged : $\bar{c} = \bar{c}(t)$, Variable : c = c(x,t)Flammability : Lower 5%, Upper 15%





- Constant temperature and density contours for the heavy cloud based on point measurement. The numbers indicate degrees (centigrade) below ambient. Figure 7.
- a) free release from evaporating source b) near instantaneous release, both with 9 lt LN_2

Som jämförelse återges en bild från SO Christensens (FBT) försök i Märsta med tung gas som av ventilationen dras in i en ca 2 m hög tunnel. Tunnels höjd framgår inte av figuren.











TOTTET	DENSITY	VP @ 200C	RP @1 ato
1 X 444	(kg/l)	(kPa)	("C)
Ethylene Oxide C ₂ H ₄ O	0.882		13.5
Propylene Oxide C ₃ H ₆ O	0.859	58.8	34.2
Hexyl Nitrate C ₆ H ₁₃ NO ₃	0.970	0.08	154
Ethyl Hexyl Nitrate C ₈ H ₁₇ NO3	0,964	0.03	100
Nitromethane CH,NO2	1,138	3.6	101

<u>,</u>		DES			
RES	FUEL	SPECIFIC VOLUME (m ³ /kg)	DETONATION PRESSURE (@P/Pg)	DEFONATION VELOCITY (m/s)	
	Ethylene Oxide	5,0	18.8	1845	
	C2H4O	7.2 (s)	17.4	1781	
		10.0	14.6	1654	
	Propylene Oxide	5.0	18.3	1753	
	C.H.O.	8.0 (s)	17.7	1745	
		10.0	15.6	1669	
	Hexyl Nitrate	5.0	20.3	1817	
	C ₆ H ₁₃ NO ₃	6.2 (s)	19.0	1776	
		10.0	14.0	1587	
	Ethyl Hexyl Nitrate	5.0	19.6	1800	
	C _g H ₁₇ NO ₃	7.2 (s)	18.3	1760	
		10.0	15.0	1635	
	Nitromethane	1.4 (s)	31.2	1916	
	CH ₁ NO ₂	5.0	12.9	1480	
		10.0	7.5	1201	



DESIGN

Cloud Development for 200-Litre FAE Test Device



BETERE ROTTENSE













arreses Royarress



arrese Royarress



DETONABILITY

Trial No.	Fuel Volume (1)	Burster Charge Mass (g)	Time Delay (ms)	Secondary Charge Mass (g)	Result
36-3	2.9	35	60	100	Detonation
36-4	3.0	35	60	50	Detonation
36-5	3.0	35	60	25	Detonation
36-6	2.9	35	60	10	Detonation
36-25	3.0	35	60	10	Detonation
36-28	3.0	35	60	9	Deflagration
36-27	3.0	35	60	8	Deflagration
36-26	3.0	35	60	5	Deflagration
36-7	3.0	35	60	RP-83 Detonator	Deflagration



arresce Roy arresse

DRES

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

BLAST PERFORMANCE

Overpressure Versus Range for 3-Litre Canisters





Positive-Phase Impulse Versus Range for 3-Litre Canisters



DEFENSE DEFENSE





RADIAL DISTANCE (m)

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

arreser RD arress













Minimum Dust Concentration (kg/m³) for 454 g C4 Charge

	RDX	2.6	Detonated
		1.9	Detonated
		1.6	Detonated
		1.5	Detonated
		1.1	Failed
	PETN	3.2	Detonated
		2.6	Detonated
		2.0	Detonated
		1.5	Failed
	TNT	- 3:0	Detonated
		2.6	Detonated
		2.2	Detonated
		1.1	Failed
BEFRET RODOLTENSE			Defence Research Establishment Suffield (DRES)

BLAST ENHANCEMENT CONCEPTS

Results of Dust Detonation Tests





2 M

W/X

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

RDX DUST

PROPYLENE OXIDE

INNO1

BEFENCE REPARTING







BLAST ENHANCEMENT CONCEPTS



NITROMETHANE THREE IRIALS: PO F/B NM (kg) (kg) 13.7 100 33.0 28.3 19.4 100 200 34.0 12.0 HOB = 1 m for all trials t = 100 ms for all trials

CO-DISPERSED PROPYLENE OXIDE

AND

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

BLAST ENHANCEMENT CONCEPTS



CO-DISPERSED PROPYLENE OXIDE AND NITROMETHANE

THREE TRIALS:

NM (kg)	PO (kg)	F/B
33.0	13.7	100
28.3	19.4	100
34.0	12.0	200

HOB = 1 m for all trials +t = 100 ms for all trials



BLAST ENHANCEMENT CONCEPTS

BLAST ENHANCEMENT SUMMARY

- In theory:
 - Overpressures increase monotonically with loading of NM or HE dust
 - Detonability not dependent on atmospheric oxygen

In practice:

arrests R arrests

- Explosive dispersal of energetic material achievable
- Requirements for detonation much more stringent than for conventional FAE









7 Murrays föredrag #2





DESIGN AND OPERATION

65-mm Line-Charge Test Device





Cloud Development for a 65-mm Line Charge





DESIGN AND OPERATION

Line-Charge Cloud Development and Detonation





Defence Research Establishment Suffield (DRES)

DESIGN AND OPERATION

BURSTER CHARGE DETAILS

- Fuel-to-burster (F/B) mass ratio © 50
 - must include hose material in calculation of F/B
- Type of high explosive not critical

 PETN, RDX, TNT
- · Hose must be completely filled with fuel
 - risk of premature ignition
- Must ensure burster stand-off from hose wall
 - risk of premature ignition
- Fluid buffer required at hose ends

- risk of premature ignition Defence Research Establishment Suffield (DRES)







Cloud Development for 65-mm Line Charges





1

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

(minute of st	Uccessiu	lly Ex	ectiled l	ine-Cha	ge Idd	5	
	Sustained Detonation							
Trial	Hose Type	Hose Length (m)	Fuel Type	Fuel-to Burster Ratio (F/B)	Initiator Time Delay (ms)	Ambient Temp. (C)	Defonation Velocity (m/s)	
8524	Unen ²	30.5	PO	71	100	33	1900	
85284	Chem-Pet ²	30.5	PO	40	150	21	1570	
8529	Unen ³	15.2	PO	47	150	21	1680	
8558	GASynCHEM	15.2	PO	38	150	18	1760	
8559	Covered Mill	15.2	PO	49	150	18	1820	
8560	Chem-Pet	15.2	PO	40	150	6	1510	
8561	Chem-Pet	30.5	PO	53	150	11	1460	
8562	Six-Pass	30.5	PO	63	150	12	1630	
8640	Redskin	15.2	PO	51	150	30	1100	
8641	Chem-Pet	15.2	PO	53	150	27	1630	
8044	Five-Pass plus	30.5	PO	54	150	24	1660	
	Six-Pass plus	15.2		63				
04514	Burlington Fabric	15.2		56				
8031	Red Chief	15.2	FFC	46	150	24	1810	
80327	LIE 05	100000	-	40	150	20	1400	



DETONABILITY

	Partial Detonation							
Trial No.	Hose Type	Hose Length (m)	Fuel I	Fuel-to Burster Ratio (F/B)	Initiator Time Delay (ms)	Ambient Temp. (C)	Mean Defonation Velocity (m/s	
85314	Chem-Pet	15.2	PO	40	150	20	1410	
8553	Redskin	15.2	PO	77	100	11	1340	
8555	Five-Pass	15.2	PO	88	100	16	1470	
8556	Covered MII	15.2	PO	73	100	17	1900	
8557	Red Chief	15.2	PO	84	100	15	1540	
8635	Chem-Pet	15.2	PO	40	100	30	1500	
		Failure to	Inific	te Deto	nation			
8550	Red Chief	15.2	PO	84	100	10	-	
8552	Red Chief	15.2	PO	84	100	16	-	
8646	Red Chief	15.2	FFC	91	150	20	-	
8548	Chem-Pet	15.2	PO	87	150	25	-	

Premature ignition ocurred but did not affect the outcome








DRES

BLAST PERFORMANCE

Overpressure Versus Range for 65-mm Line Charges



BLAST PERFORMANCE

Positive Impulse Versus Range for 65-mm Line Charges





BLAST PERFORMANCE

Overpressure Versus Range for 65-mm Line Charges



BLAST PERFORMANCE







Tow Cable

BEFESCI RODDEFENSI

Launch Rall

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

71





Defence Research Establishment Suffield (DRES)



APPLICATIONS

FALCON MINEFIELD BREACHER



arresce Roberts se

Defence Research Establishment Suffield (DRES)











Mine Casing Damaged from NM Droplet Detonation

arrise Warriss

Defence Research Establishment Suffield (DRES)



BLAST ENHANCEMENT

A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PRO						
NO.	Length (m)	Configuration	Delay (ms)	VOD (m/s)		
9226	10	21.3 g/m; buffered; floating	5	Detonation; VOD= 4850		
9247	10	21.3 g/m; buffered; floating	5	Detonation		
9227	10	21.3 g/m; buffered; standoff ¹	5	Transition during dispersal		
9062	7	32.0 g/m; buffered; floating	5	Detonation		
9070	10	32.0 g/m; buffered; floating	5	Detonation; VOD= 3050		
9071	10	32.0 g/m; buffered; floating	5	Detonation; VOD= 2960		
9208	5	32.0 g/m; buffered; floating	5	Detonation; VOD= 4450		
9235	10	32.0 g/m; buffered; floating	5	Detonation		
9236	10	32.0 g/m; buffered; floating	5	Detonation		
9238	10	32.0 g/m; buffered; floating	5	Detonation; VOD= 2460		
9210	5	32.0 g/m; buffered; standoff ¹	5	Detonation; VOD= 4370		
9217	5	32.0 g/m; buffered; standoff ¹	5	Detonation		
9213	5	42.6 g/m; buffered; floating	5	Detonation; VOD= 3320		

² Fuel dispersal was successful for the first 7 m followed by transition to bulk detonation



BETESCI REPARTNE

X

ENHANCED BLAST

NITROMETHANE SUMMARY

- Overpressures increase monotonically with NM loading
- Detonability not dependent on atmospheric oxygen
- Detonation pressure and damage potential highly dependent on local NM loading
- Explosive fuel dispersal possible but difficult
- Requirements for detonation more stringent than for conventional FAE

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

Defence Research Establishment Suffield (DRES)

8 Murrays föredrag #3

Heterogeneous Explosives and Blast Waves

S B Murray Defence Research Establishment Suffield

Box 4000, Medicin Hat, Alberta, TIA 8K6, Canada

Presentation Outline

•	Observation from the Literature	sid 80-84
•	Canadian Study of Explosively Dispersed Pa	articles- 85
•	Multi-Phase Deflagration-to Detonation Transition (DDT)	95-108
•	Conclusions	107
•	Challenge	108

Open Literature, <u>Lanovets et al</u>.

- Particle velocity constant (5x sonic speed)
- Number of particles and particle momentum transfer increase monotonically with mass of particles (up to one third the mass of explosive)
- For largest particles, 20 % overtake shock wave accounting for 25 % total momentum transfer through contact surface



Open Literature, Fedorov et al

• Particle trajectories tailorable

- can overtake contact surface or shock wave at predetermined radius

-thin shell, thick shell, variable shell

-shell inversion possible

• Particle ignition times tailorable

-ignition from inside \Rightarrow out or outside \Rightarrow in

-delayed ignition of all particles simultaneously

PROBLEM MODELLED BY FEDOROV, TETENOV AND VEYSSIERE



CASE	GEOMETRY	PARTICLE SIZE AND POSITION	RESULT
1	Spherical	$r = 3 \ \mu m$ $r_p = 6, 7 \ and 8 \ cm$	Particles ignite successively beginning with the one closest to the HE. All particles go through three stages of heating.
2	Spherical	$r = 3 \ \mu m$ $r_p = 9,10 \ and \ 12$ cm	The particle furthest from the HE undergoes one stage of heating and ignites first.
3	Spherical	$r = 1 \text{ to } 2 \ \mu m$ $r_p = 6 \ cm$	Particles ignite in the plug during first stage of heating
4	Spherical	$r = 2 \text{ to } 6 \mu \text{m}$ $r_p = 6 \text{ cm}$	Particles ignite in the plug after three stages of heating.
5	Spherical	$\begin{array}{l} r=7 \text{ to } 8 \ \mu\text{m} \\ r_{p}=6 \ \text{cm} \end{array}$	Same as above but particles cool somewhat after overtaking SW
6	Spherical	$\begin{array}{l} r=5 \ \mu m \\ r_{p}=6, \ 7 \ and \ 8 \\ cm \end{array}$	Ignition times are 36, 40 and 46 μs.
7	Cylindrical	$r = 5 \ \mu m$ $r_p = 6, 7 \ and 8 \ cm$	Ignition times are 35, 36 and 37 μs.
8	Cylindrical	$r = 3 \ \mu m$ $r_p = 6, 7, 8, 9, 10,$ 12,13, 14 and 15 cm	Ignition times are 22, 23, 4, 4, 4, 4, 4, 4, and 4.5 μs

RESULTS FROM THE MODEL OF FEDEROV, TETENOV_AND VEYSSIERE -REACTING –

HE – sprängämne, CS – kontaktyta mellan DP (detonantionsprodukter) och luft.

CASE	GEOMETRY	PARTICLE SIZE AND POSITION	RESULT
1	Spherical	$r = 0.1 \ \mu m$ $r_p = 6, 7 \ and 8 \ cm$	Particles move in compact group and overtake CS.
2	Spherical	$\begin{array}{l} r=1 \ \mu m \\ r_{p}=6, \ 7 \ and \ 8 \ cm \end{array}$	Particles move in compact group and overtake CS.
3	Spherical	$\label{eq:r_p} \begin{array}{l} r=5 \ \mu m \\ r_p=6, \ 7 \ and \ 8 \ cm \end{array}$	Particles move in compact group and overtake CS at large distance.
4	Spherical	$r = 10 \ \mu m$ $r_p = 6, 7 \ and 8 \ cm$	Particles do not bunch together in the plug. trajectories interact, then diverge. Particles closets to HE overtake shock and than drop back into the plug.
5	Spherical	$r = 25 \ \mu m$ $r_p = 6, 7 \ and 8 \ cm$	Same as above.
6	Spherical	$r = 50 \ \mu m$ $r_p = 6, 7 \ and 8 \ cm$	Same as above.
7	Spherical	$r = 15 \ \mu m \text{ for}$ $r_p = 10 \ cm \text{ and}$ $r = 10 \ \mu m \text{ for}$ $r_p = 12 \ cm$	Particles move together and overtake CS.
8	Cylindrical	$r = 25 \ \mu m$ $r_p = 6, 7 \ and 8 \ cm$	Particles have short residence in DP, then enter plug with diverging trajectories. Particles closest to HE approach SW but do not overtake it.

RESULTS FROM THE MODEL OF FEDEROV, TETENOV_AND VEYSSIERE -NONREACTING –

HE – sprängämne, CS – kontaktyta mellan DP (detonantionsprodukter) och luft.7

Open Literature, Boiko et al.

- Energic combustion process possible in dust slug near end wall after shock reflection
- Ignition time controlled by smallest particles in the system
- Minimum concentration of dust required to promote "kindling effect" leading to run-away reaction



APPARATUS EMPLOYED BY BOIKO, LOTOV AND PAPYRIN

DUST DISTRIBUTION BY ENTRAINMENT OR EJECTION

Canadian Study

EXPLOSIVE DISPERSION of SOLID PARTICLES and TARGET RESPONSE

Air Air *

To study the feasibility and the mechanism for solid particles penetrating the shock front by means of an explosion.

Reference: Lanovets et al. (1991)

Summary of Experimental Parameters

- <u>Charge geometry:</u> 180 field trials carried out in cylindrical and spherical geometry
- <u>Charge size/mass:</u> spherical charges of 8.9 cm (180 g NM),11.8 cm (440 g NM), and 21.2 cm (2400 g NM) diameter
- <u>Bead diameter:</u> steel beads from 50 μm -1 mm in diameter (most data for 100 μm, 275 μm, 463 Jim and 925 μm diameter)
- <u>Diagnostics:</u> Flash X-ray radiography, contact gauges, piezoelectric pressure transducers

(NM är nitrometan CH₃NO₂)

Numerical Simulations by Fan Zhang, CDL IFSAS code using a 2-fluid multiphase model for gas-solid flows.

EULERIAN TWO-FLUID MODEL APPROACH

- Euler equations for compressible real gas and solid particle flow
 - Momentum and convective heat exchange between the two phases
 - JWL explosion products and van der Waals'air

NUMERICAL SCHEME

- Second-order Godunov-type scheme (Colella et al. 1985, 89, 90) with Roe's Riemann solver for real gas flow
- MacCormack predictor-corrector and FCT(Boris et al. 1976, 87) for solid particle flow
- Operator time-splitting for interactions between the two phases



NM = nitrometan







Charge: NM+10%TEA with Fe 463 um, φ_p = 0.62



Radius, m









EFFECTS OF PARTICLE SIZES





Charge: D = 11.8 cm, NM+10%TEA with Fe 463 um, $\phi_p = 0.62$



----blast, solid vol=0.3 part. front, solid vol=0.3 O exptl blast, solid vol=0.62 □ exptl part. front, solid vol=0.62



EFFECT OF STEEL PARTICLES ON BLAST OVERPRESSURE (430 g NM + 10% TEA with and without 4.3 kg of 463 μm steel beads)

EFFECT OF STEEL PARTICLES ON BLAST IMPULSE (11.8 cm sphere containing 275 µm steel beads and NM + 10% TEA)



EFFECT OF STEEL BEAD SIZE ON BLAST OVERPRESSURE AND IMPULSE



CONCLUSIONS

- Solid particles can penetrate the blast wave front g a heterogeneous explosion. This phenomenon is a consequence of the coupling between the deceleration of the blast wave and the particle inertia.
- The overtaking radius is sensitive to the charge geometry, the charge size and the particle material density.
- There exist a particle size limit, below which particles cannot penetrate the blast wave front. Above this limit, the overtaking radius is not sensitive to the particle size.

DDT

DDT SCENARIO VIA REFLECTED SHOCK

- Kogarko (1958): 4%C₃H₈ + Air, p_{max} = 450 atm
 Craven & Grieg (1968): 50%NH₃ + 50%N₂O 330-400 atm



DDT SCENARIO VIA REFLECTED SHOCK

6.75 % C_2H_2 + Air, p_0 = 1 atm, T_0 = 300 K

- +: Flame O: Precursor Shock
- Reflected Detonation





Temperature Behind Reflected Shock and Calculated Induction Time (Warnatz)



DDT SCENARIO WITH A DENSE MULTIPHASE SLUG

Väg-tiddiagram (nederst) och tryckprofiler (överst) för fyra tider t_1 till t_4 (Notera de tre separata nollnivåerna) Svart markering = slug. Strax innan t_3 sker DDT

DDT SCENARIO VIA REFLECTED SHOCK WITH DUST SLUG

6.75% C_2H_2 + Air, $P_0 = 1$ atm, $T_0 = 300$ K $\sigma = 10$ kg/m³

- + Flame
- Precursor Shock
- Reflected Shock
- C-J Detonation
- × Transmitted Shock
- **Reflected** Detonation



DDT SCENARIO VIA REFLECTED SHOCK WITH DUST SLUG

6.75% $C_2H_2 + Air, P_0 = 1 \text{ atm}, T_0 = 300 \text{ K}$ $\sigma = 10 \text{ kg/m}^3$

Temperature

Behind first reflected shock, S₂, in gas
 × Behind first reflected shock, S_{3a}, in multiphase slug



 S_2 och S_{3a} visas i ett tidigare väg-tiddiagram.

DDT SCENARIO VIA REFLECTED SHOCK WITH DUST SLUG

6.75% C_2H_2 + Air, $P_0 = 1$ atm, $T_0 = 300$ K $\sigma = 10 \text{ kg/m}^3$

+ Flame
● Reflected Shock
○ Precursor Shock
□ C-J Detonation
■ Reflected Detonation



Flame Mach number

DDT TEST WITH A DENSE MULTIPHASE SLUG

• tube: 8 cm ID and 4.5 m length • 200 mJ Electrical spark • 6.75%C₂H₂ in air: $p_0 = 1$ atm, T₀ ~ 298 K 100 mm suspension of Al dust: $d_p = 5 \ \mu m, \ \sigma_p = 5 - 20 \ kg/m^3$ Pressure Transducers Ignition Spark Dust Suspension Air Injection



Det i början låga trycket (underst 11 atm vid ändväggen) orsakat av deflagrationen stiger kraftigt vid DDT (underst till 255 atm)


Jfr bild på föregående och efterföljande sida



Jfr bild på föregående sidor. Mycket höga tryck kan alltså genereras vid förlopp som startas som brand.



Figure 5.12 Peak pressures for DDT in a 6.75% C_2H_2 -air mixture at $p_0 = 1$ atm with a 100-mm end slug of RDX or Al dust. A 40-mm orifice plate is inserted 84-mm from the ignition spark. El: RDX; O: aluminum; •: aluminum results via multiple reflections.

<u>Figurtext</u>: Peak pressures for DDT in a 6.75 % C_2H_2 -air mixture at $p_o = 1$ atm with a 100-mm end slug of RDX or Al dust. A 40-mm orifice plate is inserted 84-mm from the ignition spart. Fyrkanter: RDX, öppna cirklar: aluminum. fyllda cirklar: aluminum results via multiple reflections.



SIMULATION OF DDT WITH A DENSE MULTIPHASE SLUG

CONCLUSIONS

Hetorogeneous Explosives

- Particle trajectories can be tailored

- Particle ignition and reaction times can be tailored
- DDT or other enhanced blast effects may be possible

Heterogeneius Blast Waves

- Inert particles can impart significant momentum to near-field targets

- Solid particles can alter pressure/impulse profiles

Multi-Phase DDT

- DDT in a multi-phase aluminum particle slug is significantly enhanced compared with the case of gas alone (500-700 atm versus 260-300 atm)

- More effective enhancement possible using RDX or RDX/al particles (800-1200 atm achieved with similar loading)

- Addition of RDX results in substantial extension of upper detonability limit

Numerical calculations indicate that particle concentration enhancement occurs in unison with pressure enhancement and can increase by a factor 10 over the initial concentration

Can these phenomena be combined to yield an effective enhanced-blast weapon?

Svaret verkar vara JA

9 Några sammanfattande kommentarer

Man brukar tala om olika generationers FAE och en utveckling har skett från den primitiva utspridningen med hjälp av en sprängladdning inne i en behållare som fälls med fallskärm till t.ex. artillerileverans.

Mer intressant ur verkanssynpunkt är manipuleringen med bränslet. Murray visar på möjligheten att kombinera en FAE-laddning med utkast av partiklar som kan vara inerta men som också kan vara reaktiva och ge upphov till en "brandvägg" med förhöjd värme- och tryckverkan i målet. En annan utveckling är att bränslet från början kan vara blandat med en oxidator. Sedan länge har man ju vetat att man får ett ca 2 gånger så högt tryck om ett kolväte antänds till detonation i syrgas jämfört med i luft. Man laborerar också med självantändande bränslen. Att säga att trycket inne i FAE-molnet är ca 2 MPa innebär, som framgått, en grov underskattning när det gäller modernare vapen.

För att kunna projektera motmedel är det väsentligt att kunna fysiken bakom brand - detonationsförloppet. Detta framgår klart av exemplet i Fig. 2.4; Det ställs stora krav vid projekteringen av aktiva skyddsåtgärder.

10 Referenser

Istället för att försöka ge en referenslista (som skulle bli mycket lång) ges istället några namn på intressanta författare.

En bra inblick får man genom att söka på kända namn som t.ex.

Bjerketvedt D, Christensen S, Edwards DH, Knystautas R, Lee JHS, Moen IO, Murray SB, Strehlow RA

Man kan också gå till proceedings från intressanta symposier som t.ex:

"International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions". I Bergen 1996 (CMI), i Schaumberg 1998. I anslutning till dessa symposier hålls numera också speciella expertmöten som "International Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions."

På nätet är lämpligt sökord "thermobaric [warheads]". Jane´s (<u>www.janes.com</u>) och liknande tidskrifter kan också ge upplysningar liksom även <u>www.fas.org</u> och <u>www.milparade.com</u>, den senare om ryska vapen.

Redaktören kan nås på siwert.eriksson@telia.com

Nedan upptas endast några svenska publikationer

Axelsson Håkan	Cloud Development and Blast Wave Measurement from Detonating Fuel Air Explosive Charge, FOA Rapport C20225-D4, 1978
Eriksson Siwert	FAE-laddningars verkan mot befästningar, FortF/F rapport 103:47, Stockholm 1978
Eriksson Siwert	Fuel Air Bomb close to Tunnel Inlets, Proceedings from MABS 8, Spiez 1983
Eriksson Siwert	FAE mot befästningar med luftintag, Militärteknisk Tidskrift 4-90
Eriksson Siwert	Egenskaper hos FAE-belastning, Confortia Rapport 2:97, Eskilstuna 1997
Lamnevik Stefan	Explosiva blandningar av gasol-aluminium-luft, FOA-rapport C 20389D1, 1980
Wirén Tommy	Rescue Center RC 90, Test Report from Minor Uncle, Räddningsverklet T84-334/94, 1984