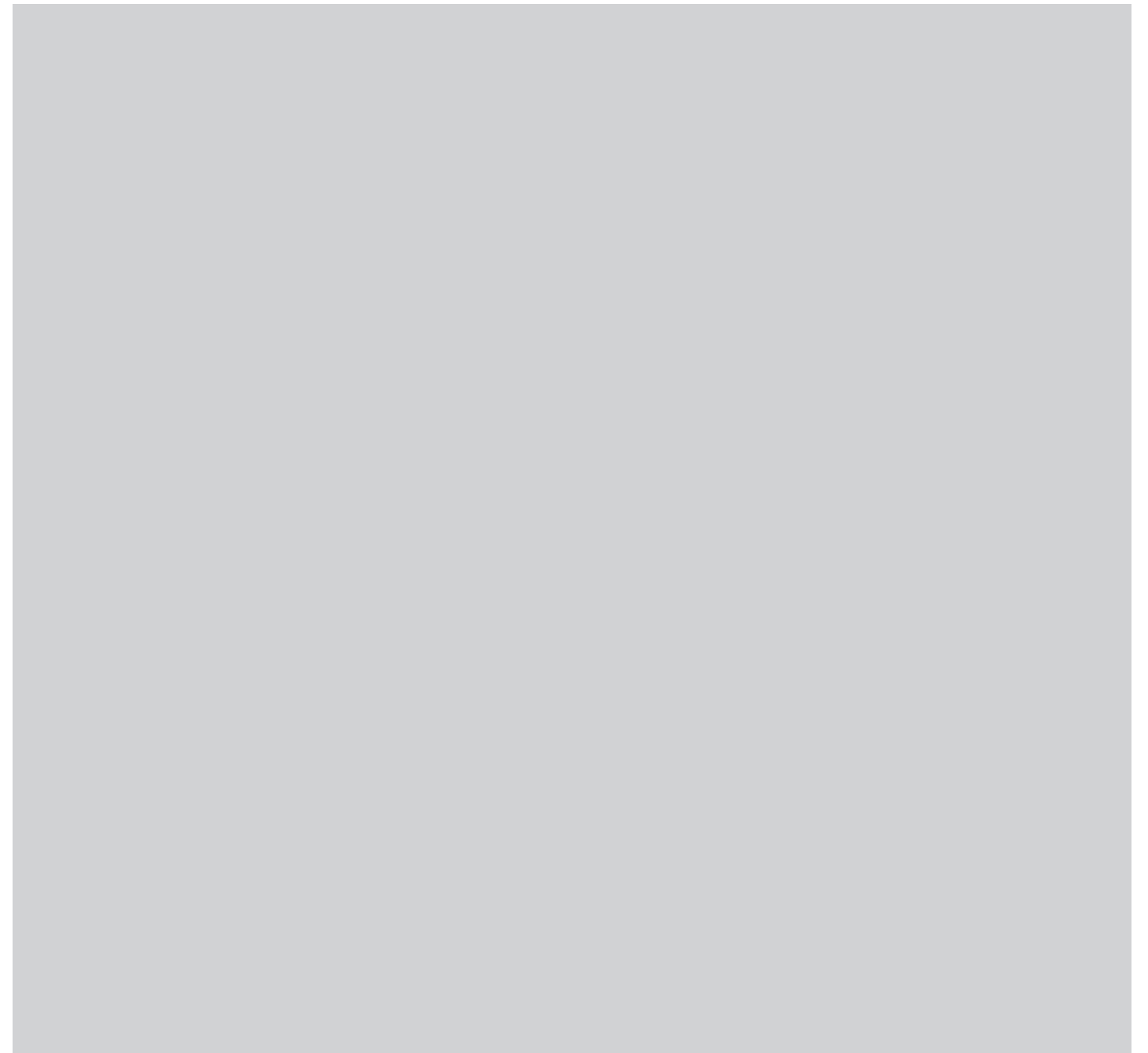


IRINA ERIKSSON



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Irina Eriksson

Sekundärsplitter: Experimentella metoder - en litteraturstudie

| | | |
|---|--|---------------------------------------|
| Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba | Rapportnummer, ISRN FOI-R--2105--SE | Klassificering Metodrapport |
| | Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd | |
| | Månad, år November 2006 | Projektnummer E2042 |
| | Delområde 51 VVS med styrda vapen | |
| | Delområde 2 | |
| Författare/redaktör Irina Eriksson | Projektledare Mats Hartmann | |
| | Godkänd av | |
| | Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten | |
| | Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig | |
| Rapportens titel Sekundärsplitter: Experimentella metoder - en litteraturstudie | | |
| Sammanfattning <p>För systemvärderingar av militära plattformar behövs underlag för att dra väl underbyggda slutsatser. Sekundära effekter ger ofta stor skada i målet och den effekt som är minst undersökt är sekundärsplitterverkan av projektiler i ordinära hastigheter. Ett experimentellt program har initierats med försök där så många parametrar som möjligt registreras. En litteraturstudie har genomförts med avseende på experimentella metoder. I de mest intressanta hastigheterna har ett fåtal studier återfunnits, men lärdom har även dragits från studier i högre hastighetsintervall. Ett antal direkta och indirekta metoder behandlas, däribland röntgenblyxfotografering, holografisk fotografering, vittnesplåtar och mjuka uppfångningsmetoder. Olika vapensystem och vanliga parametervariationer, som textmaterial och projektilformer, behandlas också.</p> <p>De slutsatser som kan dras från tidigare studier är att fragmenteringen ökar med hastigheten och hårdheten hos materialen. Det finns dock få försök i det önskade hastighetsintervallet vilket ytterligare motiverar en mer grundlig experimentell verksamhet.</p> | | |
| Nyckelord Sekundärsplitter, försöksmetodik, röntgenfotografering, holografi, vittnesplåtar | | |
| Övriga bibliografiska uppgifter | Språk Svenska | |
| ISSN 1650-1942 | Antal sidor: 21 s. | |
| Distribution enligt missiv | Pris: Enligt prislista | |

| | | |
|--|--|--|
| Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba | Report number, ISRN FOI-R--2105--SE | Report type Methodology report |
| | Programme Areas 5. Strike and protection | |
| | Month year November 2006 | Project no. E2042 |
| | Subcategories 51 Weapons and Protection | |
| | Subcategories 2 | |
| Author/s (editor/s) Irina Eriksson | Project manager Mats Hartmann | |
| | Approved by | |
| | Sponsoring agency Swedish armed forces | |
| | Scientifically and technically responsible | |
| Report title (In translation) Behind armour debris Experimental methods - a literature review | | |
| Abstract <p>To evaluate military platforms regarding lethality/survivability a knowledge base of the important effects is needed. Secondary effects can yield great damage inside a platform och the effect that is least examined is the behind armour debris effect caused by projectiles at ordinary velocities.</p> <p>This is reason for initiation of an experimental program with ability to register as many parameters as possible. A survey of earlier studies has been performed. In the velocity range of interest very few studies have been found but experiences from studies in a higher velocity range have been regarded.</p> <p>A number of direct and indirect methods are mentioned, for example x-ray flash photography, holographic photography, witness plates and soft catchers. A few weapon systems are also mentioned as well as common variables, such as material properties and projectile shape.</p> <p>General conclusions from former studies are that the fragmentation increases with the velocity and the hardness of the material. However, the experiments are few in the velocity range of interest which motivates an experimental investigation.</p> | | |
| Keywords Behind armour debris, experimental methods, x-ray photography, holographic photography, witnessplates | | |
| Further bibliographic information | Language Swedish | |
| ISSN 1650-1942 | Pages 21 p. | |
| | Price acc. to pricelist | |

Innehållsförteckning

| | |
|---|-----------|
| INLEDNING | 5 |
| BAKGRUND | 5 |
| FÖRSÖKSMETODIK | 6 |
| UTSKJUTNINGSTEKNIKER | 6 |
| DIREKTA MÄTMETODER | 7 |
| <i>Fotografering</i> | 7 |
| <i>Röntgenblixtfotografering</i> | 8 |
| <i>Holografisk fotografering</i> | 8 |
| INDIREKTA MÄTMETODER | 9 |
| <i>Vittnesplåtar</i> | 9 |
| <i>Ballistisk pendel</i> | 10 |
| <i>Mjuk uppfångning</i> | 11 |
| PARAMETERVARIATIONER | 12 |
| HASTIGHETSOMRÅDEN | 12 |
| PROJEKTIL- OCH SPLITTERFORMER | 12 |
| PROJEKTIL- SPLITTER- OCH MÅLMATERIAL | 12 |
| EXPERIMENTELLA STUDIER | 13 |
| HASTIGHETSINTERVALL 0.15 – 2.6 KM/S | 13 |
| <i>Slutsatser</i> | 14 |
| HASTIGHETSINTERVALL 1.7 - 5 KM/S | 15 |
| <i>Slutsatser</i> | 17 |
| DISKUSSION OCH FÖRSLAG PÅ EXPERIMENTELL STUDIE | 17 |
| REFERENSER | 18 |
| APPENDIX | 20 |
| APPENDIX I: JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA STANAG VITNESPAKET | 20 |
| APPENDIX II: FÖRSÖK MED HHS-PLÅTAR OCH 7.62 MM AP M2 | 20 |
| APPENDIX III: FÖRSÖK MED OLIKA STÅLPLÅTAR OCH 7.62 MM AP M2 | 21 |

Inledning

Interaktionen mellan en penetrerande stridsdel och ett ballistiskt skydd kan delas in i tre huvudfaser: penetration, perforation och restverkan. Restverkan kan betraktas som den del av förloppet som resulterar i utslagning medan penetration och perforation är förmågan att komma igenom det ballistiska skyddet och därigenom möjliggöra utslagning. Restverkan innefattar alla bakomliggande effekter såsom splitter, brand, tryck och rök men även stötvågseffekter från t.ex. kontaktdetonation eller minsprängning.

Inom projektet ”värdering av vapenverkan och plattformars sårbarhet” studeras bland annat kopplingen mellan restverkanseffekter och utslagssannolikheten. Man skiljer här på primär och sekundär restverkan. Primära effekter tillskrivs stridsdelen och är vanligtvis i form av granat-, RSV- (riktad sprängverkan) eller projektilfragment medan sekundära effekter härrör från målet självt.

Flera studier över restverkanseffekter från splitter, tryck, rök och eld har genomförts vid FOI (tidigare FOA). Merparten av dessa är genomförda med verklig ammunition som i sig är splitterbildande (t.ex. granater) vilket gör det svårt att dra generella slutsatser. Med anledning av detta planeras en studie där framför allt sekundärsplittereffekter från finkaliberprojektiler ska undersökas både experimentellt och numeriskt med målet att ta fram en bättre modellbeskrivning av verkan från sekundärsplitter. Denna typ av modellbeskrivning är nödvändiga för att man ska kunna genomföra verkansvärderingar på ett objektivt sätt och kan dessutom leda till rekommendationer för hur verkan av sekundärsplitter ska kunna minimeras.

Denna rapport behandlar olika experimentella metoder som använts för studier av sekundärsplitter. Syftet är att identifiera den lämpligaste metoden så att man kan erhålla så många intressanta parametrar som möjligt ur ett begränsat antal experiment.

Bakgrund

Intresset för sekundärsplittereffekter har historiskt varit störst i samband med rymdtillämpningar. Kollisioner med rymdgrus är ett stort problem för satelliter och andra rymdfarkoster. Dessa kollisioner sker i mycket höga hastigheter (>5 km/s) och resulterar vanligtvis i stora mängder sekundärsplitter som kan slå ut hela rymdfarkosten. Därför har betydande resurser satsats på studier av höghastighetskollisioner vilket resulterat i en mängd undersökningar i hastigheter mellan 5 och 10 km/s.

Fram till mitten av 90-talet finns ett fåtal undersökningar publicerade som täcker även lägre hastighetsområden (<1000 m/s). På senare tid har dock bland andra Ravid och Bodner [1,2] presenterat arbeten där sekundärsplittereffekten av finkalibrig ammunition mot stålplåtar av olika tjocklek och hårdhet undersökts.

Det faktum att informationsutbudet i den öppna litteraturen varit mycket begränsat gällande sekundärsplittereffekter av militär ammunition behöver inte innebära att det inte har genomförts några sådana undersökningar. Det kan istället betyda att denna information inte gjorts allmänt tillgänglig.

Försöksmetodik

För att kunna bedöma effekterna av sekundärsplitter i t.ex. ett fordon behövs information om antalet splitter, splittrens storleks-, hastighets- och massfördelning, splittrens utspridningen i rummet och deras inbördes form. För att kunna registrera dessa parametrar har mer eller mindre avancerade försöksmetoder utvecklats.

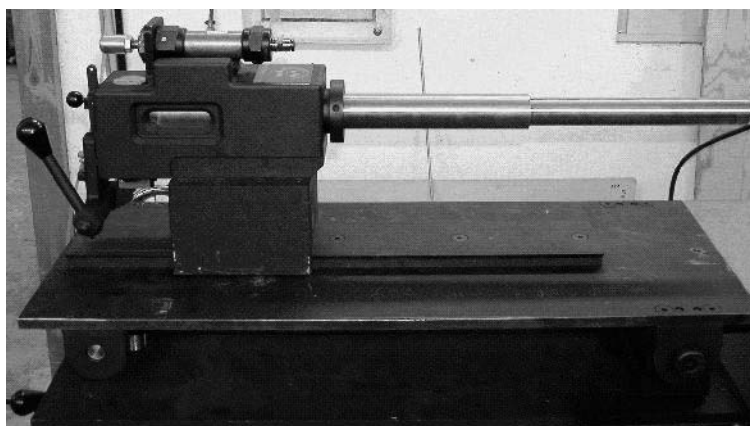
Det är ur utvärderings- och modelleringssynpunkt alltid önskvärt att den valda försöksmetoden ger en så väldefinierad och reproducerbar sekundärsplitterbildning som möjligt. Detta innebär att i de fall där det inte krävs att man utgår från verkliga stridsdelar och skyddskonstruktioner, kan man vinna på att utnyttja förenklade målgeometrier samt använda laboratorieladdningar eller egenutvecklade projektiler.

Omvänd skjutteknik är ett exempel på renodling av försöksmetodiken. Där accelereras målet mot en stationär projektil i stället för tvärtom. Den omvända försökstekniken möjliggör studier av interaktionsförhållanden som annars är svåra eller omöjliga att erhålla på ett reproducerbart sätt med normala rättvända metoder. Det är dock viktigt att komma ihåg att man vid denna typ av experiment kan tvingas till avsteg från den situation man egentligen vill studera, t.ex. vad gäller försöksskalan.

Utskjutningstekniker

Beroende på vilket hastighetsområde som ska studeras används olika typer av utskjutningsanordningar vid studier av sekundärsplitterbildning. I samband med penetrerande hot kan tre karakteristiska hastighetsområden särskiljas. Mellan 500 och 1000 m/s hamnar merparten av finkaliberprojektilerna (<14.5 mm) samt lätta splitter. I området 1000-2500 m/s återfinns KE-projektiler (kinetisk energi), större splitter samt EFP (explosive formed projectile). Hastigheter över 2500 m/s ses i huvudsak hos RSV-fragment. I detta avsnitt omnämns några utskjutningsanordningar tillgängliga på FOI som tillsammans täcker in ett stort hastighetsintervall.

På FOI finns *finkalibriga vapen* för standardammunition i kalibrar från 5.45 mm upp till 14.5 mm, se Figur 1, samt försöksvapen med slätborrade pipor upp till 20 mm. Dessa är speciellt framtagna för försök med splittersimulatorer och specialprojektiler.



Figur 1. Finkalibervapensystem

Krutkanoner möjliggör hastigheter upp till ca 2 km/s. FOI har en 30 mm slätborrad krutkanon med tillhörande mål- och registreringstank. Kanonen kan accelerera ca 90 g till drygt 2 km/s.

Lättgaskanoner möjliggör studier vid höga hastigheter, från typiskt 1.5 km/s upp mot 8 km/s beroende på projektilmassa. FOI har en två-stegs lättgaskanon som kan accelerera några hundra gram till 2 km/s och knappt 10 gram till 8 km/s. Utrustningen, se Figur 2, har olika eldrör med diametrar mellan 20 och 40 mm. Flera försökstankar är sammankopplade med kanonen.



Figur 2. Två-stegs lättgaskanon

Då de planerade försöken i denna studie inledningsvis ska ligga i ett lägre hastighetsintervall kommer i huvudsak finkalibriga vapen att användas.

Direkta mätmetoder

Vid studier av sekundärsplittergenerering är det intressant att bestämma t.ex. hastigheter och spridningsvinklar hos fragmenten och det finns flera fotografiska metoder för att göra detta. Exempel på sådana metoder är fotografering med blixtröntgen alternativt med lasertekniker samt höghastighetsfotografering. Dessa tekniker kommer att behandlas närmre i nedanstående stycke.

Den registreringsutrustning som finns på FOI för denna typ av studier består i huvudsak av röntgenblixtar (från 105 till 1200 kV), en digital höghastighetskamera, en laserinterferometer (VISAR) samt flera äldre mekaniska höghastighetskameror. Det finns även andra typer av enklare utrustning för hastighetsmätning tillgängligt.

Fotografering

Vanlig fotograferingsteknik är en av de enklare direkta registreringsteknikerna. Då både analog film och digitala kameror finns som standard är detta även en relativt billig teknik som möjliggör direkt analys av resultatet. Denna teknik kan dock vara svårt att använda vid penetrationsförlopp då en kortvarig men intensivt ljusblxt samt damm och partiklar avges då projektilen träffar målet. Dessa störningar kan delvis undvikas med skärmning, optiska filter i kombination med lämplig ljuskälla samt genom att placera registreringsutrustningen på större avstånd från målet.

För att bilder med liten eller försumbar rörelseoskärpa ska erhållas måste också exponeringstiden vara mycket kort. Antingen kan exponeringstiden styras via en snabb sekundär ljuskälla eller via en snabb slutare på kameran [3].

För generering av korta ljuspulser används vanligtvis blixtrör (flash tube) eller en pulsad laserkälla. Blixtröret avger en kort ljuspuls när en högspänningsurladdning sker i ett rör fyllt med xenon eller argon [3]. Ljuspulsen kan också erhållas genom att skicka en kraftig stötvåg genom gasen (argonbomb). Extremt korta ljuspulser (pikosekunder) kan erhållas med en pulsad laserkälla.

Exempel på kameror med snabba slutare är Kerrcellkameran och bildomvandlarkameran. Kerrcellkameran har en elektrisk slutare som bygger på Kerreffekten. Här utnyttjas den optiska polariseringen som uppstår i vissa isotropa vätskor (t ex nitrobenzen) när en hög spänning appliceras över vätskan. Med hjälp av två polarisationsfilter vridna 90° kan ljusspassagen genom

vätskan styrs via ett högspänningsaggregat [4,5]. Polarisations-effekten i vätskan sker momentant varför slutartider ner till nanosekunder är möjliga. Nackdelen med denna slutare är att relativt mycket ljus absorberas i vätskan. Detta gör det svårt att fotografera ljussvaga föremål utan hjälp av kraftfulla ljuskällor.

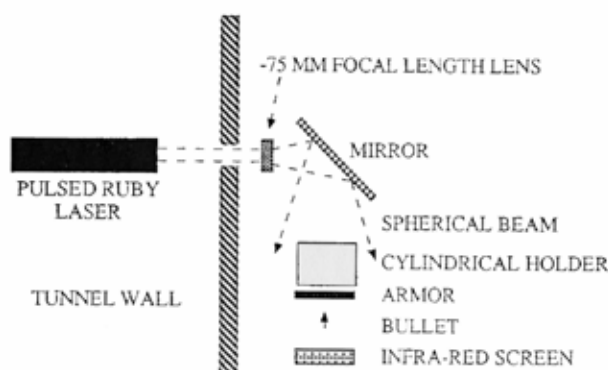
Den slutare som används i bildomvandlarkameror utnyttjar den fotoelektriska effekten [3]. Bildomvandlarröret överför först den optiska bilden till en ekvivalent fördelning av elektroner som sedan fokuseras, förstärkas och switchas (på och av) elektroniskt. Bilden/bildsekvensen (typiskt åtta bilder) överförs slutligen på en fosforskärm som i sin tur fotograferas av med en digital eller filmbaserad kamera för att erhålla en beständig bild. Fördelen med en bildomvandlarkamera är framför allt den inbyggda ljusförstärkningen (upp till en faktor 50) samt möjligheten att variera tiden mellan bilderna, att välja exponeringstid för varje bild individuellt samt möjlighet till extremt kort exponeringstid (0.1-0.001 μ s). Man kan även analysera resultatet direkt (då en polaroid- eller digitalkamera används) [6]. I många moderna system går man dock ifrån bildomvandlarröret och använder flera snabba CCD:er istället.

Röntgenblixtfotografering

Fotografering med blixtröntgen kan göras med olika spänning [7]. Används blixtröntgen med hög spänning (hård röntgen) kan material med hög densitet genomlysas men upplösningen är vanligtvis låg. Detta innebär att det kan vara svårt att särskilja enskilda fragment i ett fragmentmoln. Denna metod kan dock användas för att studera fragmentmolnets form och hastigheten vid dess front. Används istället blixtröntgen med låg spänning (mjuk röntgen) erhålls en bättre upplösning och enskilda fragment kan studeras. Det är dessutom möjligt att direktexponera filmen utan förstärkningsskärm. Att bestämma molnets täthet kan vara problematiskt. En lösning kan vara att placera en plåt med en skåra framför det område som fotograferas och därmed enbart studera en sektion av molnet [8,9].

Holografisk fotografering

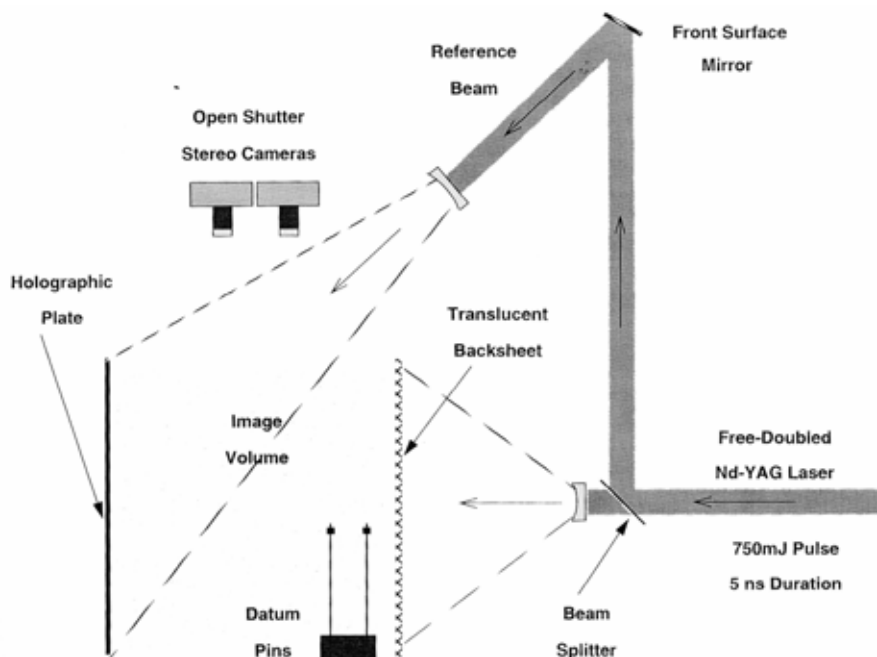
En relativt ny metod är att använda holografisk fotografering [10-12]. Med denna teknik kan en tredimensionell bild av splittermolnet erhållas. Fördelen med denna metod är att möjligheterna finns att mäta tredimensionella storleks-, form- och hastighetsprofiler av splitter från ett perforationsförlopp. I ett större perspektiv kan denna metod användas för att testa vapenverkan och effekter av olika vapen och ammunitionstyper. Metoden är speciellt intressant vid experiment med lågdensitetsmaterial (t ex aluminium, plast eller fiberkompositer), vilka används i flygplan och kompositkyddsmaterial. Dessa material är normalt svåra att avbilda på ett tillfredställande sätt med röntgenblixtfotografering.



Figur 3. Experimentell uppställning för cylindriskt hologram [11]

Ett sätt att skapa ett användbart hologram är genom att fånga förloppet med hjälp av en pulserad laser och en halv-cylindrisk film, se Figur 3. Med denna uppställning kan förloppet studeras i 180 grader. Nackdelen är dock att när registreringen är filmbaserad blir det problem att erhålla tillräckligt jämn bildkvalitet, eftersom filmen riskerar att påverkas av förloppet. Istället för en mjuk böjbar film kan istället en glascylinder med emulsion användas, men då krävs det en

glascylinder för varje försök. Ett annat alternativ är att använda plana holografiska plattor av glas, se Figur 4, som är billigare i inköp och smidigare att handskas med. Denna uppställning eliminerar den cylindriska uppställningens spegel som förbrukas för varje skott, är kostsam och kan ge upphov till nya fragment. Denna uppställning möjliggör dock inte en 180° graders vy.



Figur 4. Experimentell uppställning för plant hologram [12]

En nackdel med holografifotografering är att utrustningen oftast är kostsam. Om en billigare pulslas används vid registreringen krävs en kontinuerlig laser för att rekonstruera hologrammet. Detta kan undvikas genom att använda en dyrare laser som både kan avge laserpulser och kontinuerligt laserljus.

Indirekta mätmetoder

Det finns andra användbara metoder som inte innefattar fotografering och dessa kan benämnas indirekta mätmetoder då resultaten analyseras i efterhand och då en bedömning görs av denna analys avseende vad som tros ha inträffat. Vittnesplåtar är ett exempel på en indirekt mätmetod där man använder tjocka och tunna plåtar i kombination, så kallade vittnespaket. Rörelsemängden hos fragmenten kan mätas med en ballistisk pendel och de kan fångas upp med mjuk uppfångning. Dessa olika tekniker kommer att behandlas mer ingående i följande avsnitt.

Vittnesplåtar

Vittnesplåtar är ett relativt enkelt redskap att använda för analys av splitter och det finns ett antal olika varianter. Plåtarna används som enstaka eller i kombination, då kallat vittnespaket. Den enstaka vittnesplåten är antingen en tunn plåt, som splitter perforerar varefter splitterfördelningen (hålmönstret) studeras, eller en tjockare plåt, där splitter skapar penetrationskanaler [10]. Tjockare vittnesplåtar används nästan uteslutande i försök då anslagshastigheten är hög. Vittnespaket används, förutom för att erhålla splitterfördelningen, även för att få en uppfattning om spridningsvinklar och penetrationsförmågor hos enskilda fragment.

STANAG 4190 [13] är en militär standard för vittnesplåtar och vittnespaket där vittnespaketet motsvarar en oskyddad soldat. I standarden specificeras tjockleken och materialet på plåtarna samt deras inbördes avstånd. För restpenetrationsstudier ska plåtarna vara av RHA (rolled homogenous armour) och minst 25 mm tjocka. För vittnespaket ska aluminium eller mjukt stål användas, placerade 25 mm från varandra och med mellanrummen fyllda med frigolit (15 kg/m³). Används både aluminium och stål ska aluminiumplåten vara närmast målet med tjocklekar mellan 1.0 - 3.2 mm (aluminium) och 0.8 - 12.7 mm (stål). Antalet olika tjocklekar ska begränsas till tre. Två olika

vittnespaket som följer STANAG 4190 har jämförts av Verolme [14], detaljer kring vittnespaketens utseende och resultatet kan ses i appendix I. Bortsett från denna standard används en mängd andra varianter av vittnespaket/plåtar valda för det specifika fallet. Materialet hos vittnesplåtarna varierar även.

Vid användning av en *tunn vittnesplåt* kan hålmönstret fotograferas och analyseras med hjälp av kontrastfotografering (fotografering i motljus). Denna metod ger bra information över splittersfördelningen och spridningsvinkeln hos splittermolnet.

Med ett *vittnespaket* kan penetrationsförmågan hos splittren undersökas. Sådana består av ett antal tunna plåtar med eller utan fyllnadsmaterial mellan. Man kan följa fragmentens gång genom paketet med spridningsvinklar, bestämma penetrationsförmågan och eventuellt även återfinna vissa fragment mellan plåtskikten. Nackdelen med denna metod är att det är svårt att uppskatta massan hos fragmenten då fragmenten kan förstöras på sin väg genom paketet. Det är även svårt att avgöra om det är massan eller fragmentets form som gjort att den penetrerat ett visst djup i vittnespaketet. Det kan således vara svårt att bedöma hur stor skada ett splitter skulle orsaka i ett verkligt mål.

Vad gäller penetrationsförmåga kan också en *tjock vittnesplåt* användas. Detta är intressant då den totala verkan kan uppskattas vilket är intressant ur verkansvärderingssynpunkt.

Nackdelen med att använda vittnesplåtar är att fragmenten kan påverkas av penetrationsförloppet och att de därför inte kan fångas upp och analyseras i efterhand, med avseende på deras massa och storlek. När det gäller en tunn vittnesplåt eller ett vittnespaket kan storleken på fragmentet uppskattas genom att finna ett förhållande mellan hålets area och fragmentens storlek. Detta är dock förknippat med problem, då hålarea beror på vilken sida fragmentet har vänt mot plåten [10]. De mest tillförlitliga resultaten erhålls då fragmenten har en knubbig form. Ett annat problem är att håldiametern varierar med hastigheten hos projektilen. Detta försvårar uppskattningen av storleken då fragmenten kan komma från såväl projektilen som målmaterialet [15]. För den tjocka vittnesplåten kan massan hos enskilda fragment uppskattas genom att mäta splittermolnets hastighet och kratervolym. Detta görs via ett samband mellan kratervolym och anslagsenergin vid specifik hastighet, under förutsättning att fragmenten är separerade så att de skapar enskilda kanaler [10]. Denna uppställning ger därför storleken, hastigheten och färdvägen för fragmenten. Metoden med att mäta penetrationskanalens volym är dock tidskrävande och okänslig och ger därför bara grova uppskattningar av energin och massan.

Det finns, som tidigare nämnts, en mängd varianter på vittnespaket och för att ta några exempel kan två enkla vittnesplåtar eller två hela vittnespaket i följd nämnas [16]. Dessa kan även kombineras med ett centrerat hål i den första som möjliggör en mer detaljerad studie av de centrerade splittren [15]. En liknande variant består av att istället för ett hål ha en skåra eller ett kryss för att studera splitter i ett eller flera plan i mera detalj [8]. För att möjliggöra mer noggrann bestämning av spridningsvinklar kan ett rutnät placeras mellan målplåten och vittnesplåten [10]. För att studera fragmenten som stöts ut på målplåtens framsida (den sida där projektilen träffar) kan en vittnesplåt med ett centrerat hål användas, där projektilen passerar igenom hålet innan den träffar målplåten.

Ballistisk pendel

Ur verkansvärderingsperspektiv kan det vara av intresse att utvärdera splittersvärmens rörelsemängd vilket kan göras med en ballistisk pendel. Denna anordning placeras relativt nära baksidan av målplåten för att fånga upp hela molnet och medför därför att enskilda splitтерkratrar inte går att observera. Detta innebär att enbart rörelsemängden kan registreras och att all information gällande t.ex. massfördelning och vinkelfördelning går förlorad. Med anledning av detta är denna metod inte vanligt förekommande.

Det finns några olika former av ballistiska pendlar som används i dessa sammanhang [10]. Ett exempel är en plåt med rörelsemängdspinnar som används för att mäta rörelsemängden hos

splittermolnets olika delar. Principen bakom detta system är att en mängd pinnar sitter med längdriktningen i samma riktning som splittermolnet förväntas komma. Pinnarna kan röra sig oberoende av varandra och deras hastighet är proportionell mot den rörelsemängd fragmentmolnet ger upphov till. En ballistisk pendel kan även bestå av en enda plåt som tar emot rörelsemängden från hela splittermolnet. Detta system kan dessutom utökas med en främre pendel, som mäter rörelsemängden hos splittermolnet på framsidan av målplåten. En kombination av en ballistisk pendel och tjock vittnesplåt kan bestå av en fastsatt del, i form av en ram, och en centrerad del som kan röra sig som en pendel [17]. Detta arrangemang tillåter både mätningar av hastighet och rörelsemängd.

Mjuk uppfångning

Vid användning av mjuk uppfångning har det främsta syftet varit att bevara fragmenten intakta och därmed möjliggöra analys av antalet fragment, deras massor och fördelning i rummet [10]. Man har även försökt att via inbromsningssträckan i mediet bestämma anslagshastigheten hos fragmentet. Innan materialet för den mjuka uppfångningen väljs bör fragmentens densitet och hållfasthet samt den förväntade storleken och hastigheten hos fragmenten beaktas. Exempel på material i mjuka uppfångningar är: vax, wallboard, vermiculite, sågspån, perlite, aerogel, vatten, sand, plywood samt olika former av skum. Ett vanligt material för uppfångning av större splitter (1g och uppåt) är träfiberplattor. Det finns dock en övre hastighetsgräns på 2 km/s för att detta material ska kunna användas. Mycket arbete har lagts på att försöka finna samband mellan penetrationsdjup i träfiberplattor och hastighet hos splitter.

Vid val av uppfångningsmaterial bör man även beakta uppfångningsmaterialets egenskaper. Det ska vara enkelt att hantera, inte vara lättantändligt samt kunna stå emot den impuls som kommer då splittermolnet träffar, dvs behålla sin ursprungliga form [10]. Dessutom är det fördelaktigt om uppfångningsanordningen kan placeras relativt långt från målplåten så att fragmenten hinner separera.

Då höghastighetsperforation ofta innebär produktion av mindre splitter med höga hastigheter har andra alternativa uppfångningsmetoder testats. Ett exempel på en sådan är uppfångning med tätare material (sk hård uppfångning) för de fall då avståndet mellan mål och uppfångningsanordning begränsas av en måltank. Risken med denna metod är att de minsta splittren inte penetrerar uppfångningsmaterialet och därmed går förlorade samt att fragmenten kan deformeras. För att undvika att de minsta splittren går förlorade har olika skiktade uppfångningsmaterial undersökts. Dessa består av skikt där det första lagren är mjukare och de följande är hårdare. Valet av material beror på den uppskattade penetrationsförmågan hos fragmenten [10].

För att utvinna information ur en mjuk uppfångningsanordning så finns det främst tre olika alternativ, nämligen röntgen, dissekering samt upplösning av uppfångningsmaterialet.

Genomlysning med röntgen är ett relativt snabbt sätt att utvinna information, såväl spatiala fördelningen som en relativt god massuppskattning kan erhållas [10]. Nackdelen med denna metod är att materialet som ska genomlysas inte kan vara för tätt, vilket innebär att denna metod enbart är tillämpbar på mjuka uppfångningsanordningar. Röntgenmetoden har dessutom relativt låg upplösning vilket innebär att små partiklar inte kan detekteras.

Dissekering av uppfångningsmaterialet ger mest information men är tidskrävande och det kan vara svårt att hitta små splitter [10]. Informationen som kan erhållas med denna metod är främst penetrationsdjup, fragmentens massa och form samt hålkanalens formförändring. För att förenkla och framförallt skynda på dissekeringen av uppfångningsmaterialet kan en högtrycksvattenstråle användas, men då går hålkanalens form förlorad.

Upplösning av uppfångningsmaterialet innebär att alla splitter kan extraheras men nackdelen är att all information om spridningsvinklar, penetrationsdjup och hålkanalernas utseende går förlorad [10]. Denna metod ger även en mer komplicerad hantering då kemiska substanser oftast måste

används för att lösa upp materialet. Försök har gjorts med att använda vattenlösliga mjuka uppfångare vilket förenklar hanteringen och därmed arbetet med att extrahera splitter.

Några har provat geléuppfångning men sedan gått över till att använda vittnesplåtar då få av splittren kunde registreras med hjälp av uppfångningsanordningen och då hanteringen blev komplicerad och tidskrävande [18, 19].

Parametervariationer

Vid systematiska studier av sekundärsplitterförlopp varieras med fördel en parameter åt gången för att kunna dra väl underbyggda slutsatser. Några vanliga parametervariationer redovisas nedan.

Hastighetsområden

Eftersom sekundärsplittereffekten påverkas starkt av projektilens/splittrets anslagshastighet är det i första hand denna parameter som varieras. Anslagshastigheten är i verkligheten inte heller konstant utan beror på vapensystemet samt detonations- eller skjutavstånd. Som tidigare nämnts finns det enbart ett fåtal studier publicerade i det lägre hastighetsintervallet (lägre än 1000 m/s).

Projektil- och splitterformer

Formen på projektilen eller splittret har också stor betydelse för sekundärsplittereffekten och flera undersökningar finns publicerade. Den sfäriska formen är vanligt förekommande i dessa sammanhang då den inte ger snedställningseffekter, vilka antas ha stor effekt på splitterbildningen. Denna form är dock inte särskilt representativ i projektil- eller splittersammanhang och uppvisar även den mildaste verkan i målet [20]. Detta har bidragit till fler studier rörande inverkan av olika projektil- och splitterformer.

Projektiler eller splitter av annan form används ofta i syfte att undersöka inverkan av nosform eller annan geometrisk skillnad. För att exemplifiera så kan projektiler med olika L/D (Längd/Diameter) och nosform nämnas samt kuber med olika anlagssidor [5,8,20-25]. Fragmentsimulerande projektiler (FSP) används ofta för att kvantifiera effekterna av genererade splitter [14].

Plattor används ofta vid studier av ren dragvågsinducerad fragmentering (spalling). Detta fenomen grundar sig på dragvågor som fortplantar sig och samverkar i mediet vilket kan medföra brott (skiktbildning) i materialet. Resultatet av detta kan bli att en bit av materialet lossnar från baksidan av plåten.

Projektil- splitter- och målmaterial

Projektiler, splitter och mål tillverkas i en mängd olika material och materialkvaliteter. Detta gör det nödvändigt att parallellt med experimentella studier utveckla modeller för hur sekundärsplitterbildningen beror av materialegenskaperna.

Variation av målmaterial kan dels innebära olika material men även olika hårdheter för samma material. En annan form av variation, som ofta kombineras med olika material, gäller målets dimensioner (oftast tjockleken) samt målplåtens vinkel [26]. De två vanligaste materialen vid sekundärsplitterundersökningar är stål och aluminium [2,4,5,8,21,27,28]. Andra material som används i liknande studier är zink och titan [5,20]. Inverkan av projektil- splittermaterialet på splitterbildningen har undersökts med exempelvis stål, titan, hårdmetall, aluminium och zink [5,8,20].

Experimentella studier

Detta avsnitt behandlar tidigare studier gällande sekundärsplitter och är uppdelat på två avsnitt; det första behandlar ett lägre hastighetsintervall och det andra ett högre. Dels behandlas de experimentella tekniker som använts i studierna och dels vilka slutsatser som drogs.

Hastighetsintervall 0.15 – 2.6 km/s

Goldsmith m.fl. har publicerat en studie där penetration, perforation och fragmentering av aluminium- och stålplåtar med sfäriska projektiler i hastigheter mellan 0.15-2.6 km/s undersökts [4]. Försöken utfördes i en krutkanon med 50 mm eldrör och hastigheterna hos projektilen mättes med en induktiv metod (spole) innan och efter målplåten. Två vittnesplåtar med ett centrerat hål för att släppa igenom projektilen placerades framför och bakom målplåten. Syftet med den främre plåten är att fånga upp de fragment som produceras på framsidan av målplåten.

De testade målplåtarna var relativt mjuka och de fragment som bildades var därför formade efter nosformen på projektilen. Detta beteende minskade med minskande duktilitet hos plåten. Diametern på fragmentet närmade sig projektildiametern med ökande anslagshastighet upp till 300 m/s. Ringfragment kunde observeras för de högsta hastigheterna (2.6 km/s).

Hohler m.fl. har gjort en undersökning vad gäller fragmenteringen hos stålplåtar med projektiler och plattor [24]. För att visuellt dokumentera fragmentering bakom en målplåt användes fyra röntgenblixtrar som triggades successivt. De var alla placerade i det plan som utgjorde baksidan av målplåten. Ett röntgenrör var placerad rakt från sidan, ett rakt uppifrån och två snett uppifrån. Röntgenblixterna var placerade på utsidan av måltanken medan filmerna placerades nära skottlinjen för att få skarpa bilder. Röntgenblixterna triggades av en laserbarriär (He-Ne) som riktades genom projektilens bana på framsidan av målplåten.

Det hårdare stålet uppvisade en spröd fragmentering vid anslag med projektiler. Det var dock ett bättre skyddsmaterial än det mjuka stålet. Det noterades även att vid anslag med tunna skivor orsakade skivorna större skada hos det mjuka stålet än hos det hårda. Detta visar på tendenser till olika processer hos stål med olika hårdhet. Slutsatserna som drogs efter denna undersökning var att vid anslag av en skiva så stöts en disk ut på baksidan (spall), vilket orsakas av en plan stötvåg. Då perforation sker med en projektil så beror inte fragmenteringen på stötvågseffekter utan främst på materialförflyttning.

Finnegan undersökte perforation och penetration av en stålplåt, i tjocklekarna 1.52, 3.43, 6.55 mm, med en sfärisk projektil i hastigheter mellan 0.2 - 2 km/s [28]. Försöken utfördes med ett 12.7 mm laborationsvapen och hastigheten mättes optiskt i eldröret med en fotodioder och en intervallräknare. Splittren fångades upp mjukt med träfiberboard.

Resultaten visade att för de lägre hastigheterna skedde ingen perforation utan projektilen deformerades och böjde ut målplåten. För högre hastigheter bildades en plugg som formades efter projektilen och för de högsta hastigheterna splittrades pluggen och i vissa fall också projektilen. Splittringen resulterade i ett fåtal splitter med oregelbunden form. Skalningstester genomfördes också för att undersöka om fragmenteringen berodde på absolut storlek hos mål och projektil. Resultatet av detta blev att fragmentering inte tycks påverkas av skalning, dvs. att det går bra att utföra realistiska försök i mindre skala.

Finnegan m.fl. fortsatte undersökningen av fragmentering med att studera sfäriska och kubiska projektiler i hastighetsintervallet 0.3 - 2.5 km/s [5]. Projektilerna var dels av mjukt stål, dels av härdat stål och av aluminium. Målmaterialet var mjukt stål i två tjocklekar, härdat stål i tre tjocklekar samt aluminium och titan. De kubiska projektilerna sköts med dels ena sidan, dels en kant och dels ett hörn mot målet. En ballistisk pendel användes i dessa försök och fragmenten fångades upp med träfiberboard.

Slutsatserna som kunde dras efter dessa experiment var att antalet fragment ökar med minskad hårdhet hos målmaterialet efter perforation av en sfärisk projektil. För tjocka mål observerades en separation av primär- och sekundärsplitter, denna separation ökar med hållfastheten och tjockleken på målmaterialet men minskar då projektilen är överdimensionerad i förhållande till målet.

Fragmenteringen på båda sidor om målplåten tyder på liknande accelerationsmekanismer. Rörelsemängden ökade linjärt med anslagshastigheten för de flesta fragmentsystem som testades.

Hohler m.fl. har också studerat splitterspridningen och den kvarvarande restprojektilen [8]. Pilprojektiler av sintrad tungmetall, stål och titan, med slankhetstalet L/D mellan 6 och 15, sköts i hastigheterna 1250 och 1700 m/s. Försöken gjordes i hel och halvskala med mål av stål och aluminium. Försöken utfördes i en lättgaskanon och röntgenblyxtfotografering användes för att registrera dels effekterna på framsidan på målplåten samt fragmentmolnets expansion, vilket studerades i ett plan med hjälp av en skårad plåt. Informationen som erhöles var antalet splitter, deras storlek, form, material och massa samt spridningsvinkeln. Undersökningen gjordes i syfte att utvärdera utbukningen på baksidan av plåten och dess uppsprickning, fragmenteringen samt fragmentspridningen nära och långt ifrån målet.

Slutsatserna var att expansionen av splitttermolnet skalar och att beroendet av de varierade parametrarna är svag. Splitttermolnet har en elliptisk form. Då densiteten är större för projektilen än för målet visar primärsplittren en mindre lateral spridning än sekundärsplittren. Fragment på samma radiella avstånd från centrumlinjen har ungefär samma hastighet. Fragmenteringen av projektilen och målmaterialet ökar med ökad hastighet.

Ravid m.fl. har gjort en sekundärsplittrestudie med HHS-plåtar (high hardness steel) och 7.62 mm AP M2 projektiler [2]. Tjockleken på plåten har varierats (6.3, 7.9 och 10.2 mm) och anslagshastigheten har hållits konstant kring 845 m/s. Ett vittnespaket bestående av fem plåtar av aluminium och med inbördes luftspalter på 10 mm placerades 400 mm bakom målplåten. Aluminiumplåtarna var av tjocklekarna 0.5, 0.5, 0.5, 1 och 1 mm. Anledningen till att luftspalter användes istället för frigolit (som använts vid andra undersökningar [15]) var att man ville bestämma penetrationsförmågan i aluminium. Efter försöken fotograferades plåtarna i motljus för att erhålla kontrastrika bilder. Bilderna skannades och utvärderades sedan med hjälp av ett datorprogram. Fragmenten antogs ta rak väg genom vittnesplåtarna och uppträda symmetriskt runt hålet. Utvärderingen av plåtarna gav arean och lokaliseringen av varje hål samt vinkeln för fragmentens gångväg genom vittnespaketet. Fragment som hittades i mellanrummen mellan plåtarna vägdes och delades upp beroende om de kom från plåten eller från projektilen. Materialegenskaperna och resultaten återfinns i Appendix II.

En fortsättning på Ravids undersökning redovisas i [27] där plåtar med olika hårdhet undersökts. Tre olika plåttjocklekar har använts, nämligen 8.0, 7.9 och 8.9 mm. Målmaterialet som användes var RHA, HHS och UHH (ultra high hardness) stål. Samma typ av projektil och samma projektilhastighet som tidigare användes. Materialegenskaperna hos projektilen och de olika målmaterialet återges i Appendix III tillsammans med de erhållna resultaten. Slutsatserna av denna undersökning var att antalet fragment ökade med ökad hårdhet hos målmaterialet.

Riedel m.fl. har undersökt effekten av en liner (skydd mot sekundärsplitter som monteras på fordonets insida) med experiment och simuleringar [21]. De har gjort försök med dels enbart stålplåtar och dels med stålplåtar med liner. Stålplåten som använts är 35 mm RHA, med Vickershårdheten 310-360 HV20. Den första försöksupställningen med liner bestod av 25 mm polyuretan, den andra av 25 mm stålskum och den tredje av 25 stålskum + 10 mm polyuretan. Dessa försöksupställningar besköts sedan med en rundnosad projektil i hårdmetall med $L/D=6$ och $D=10$ mm. Anslagshastigheten var 1700 m/s och anslagsvinkeln var 0° NATO (vinkelrätt anslag). Röntgenblyxtar på 150 kV användes för att mäta projektilens snedställning vid anslag samt för att studera splitttermolnets spridning. En vittnesplåt med dimensionerna 1 x 1 x 0.5 mm placerades 0.7 m bakom målet för att bestämma splittrens penetrationsförmåga.

Slutsatser

De viktigaste slutsatserna från ovanstående undersökningar är följande:

- Fragmenteringen av såväl projektil som mål ökar med ökande anslagshastighet
- Antalet fragment ökar med ökad hårdhet hos målmaterialet

- Fragmenteringen och expansionen av splittermolnet skalar, dvs man kan själv välja lämplig försöksskala
- Fragmentering vid anslag utan efterföljande perforation orsakas av spall
- Fragmentering vid perforation beror främst på materialförflyttning
- Mjuka plåtar ger fragment som är formade efter projektilnosen
- Högre anslagshastighet mot mjuka plåtar ger fragment med en större radie (upp till projektilradien)
- Hårda plåtar producerar fragment som är formade efter projektilnosen om hastigheten är tillräckligt låg
- Separation av fragmentmolnen från målet resp. projektilen beror av hållfastheten och densiteten hos målet och projektilen samt tjockleken hos målmaterialet
- Fragment på samma radiella avstånd från centrumlinjen har ungefär samma hastighet

Hastighetsintervall 1.7 - 5 km/s

I detta hastighetsintervall behandlas några studier mycket översiktligt och med fokus på experimentell metodik.

Stilp m.fl. har studerat splitترفördelningen när sfäriska projektiler i stål och hårdmetall perforerar tunna plåtar i mycket höga hastigheter (2.3-4.5 km/s) [29]. Maximala och minimala splitтерhastigheter vid fronten och bakändan av splittermolnet registrerades med fem röntgenblixtar. Uppställningen bestod av en plåt, som fångade upp drivspegeln, följt av målplåten och en uppfångningsplåt. Fotografering gjordes före fångaren, efter målplåten samt före/efter uppsamlingsplåten. Analysen gjordes från röntgenblixtfotografierna och från uppsamlingsplåtens utseende.

De generella slutsatserna som drogs var att utseendet på splittermolnet påverkas starkt av projektilens geometri, anslagsvinkeln, ingående material och anslagshastigheten. För båda projektilmaterialen är den normaliserade håldiametern D/d linjärt beroende av anslagshastigheten. Den bakomliggande effekten, som registreras av fångningsplåten, beror på formen, storleken, antalet splitтер/volymer och fragmentens fysikaliska tillstånd.

Gurson har gjort försök med en rundkula och en cylinder i stål med 120 graders konformad nos [23]. Ett vittnespaket av aluminium användes för att följa splitترفördelningen. Avsikten var att studera tillämpbarheten av linjär skalning vid fragmenteringsprocesser.

Charles E. Andersson Jr m.fl. har undersökt sekundärsplitterbildningen då tungmetallprojektiler med slankhetstalet $L/D = 30$ penetrerar 457 mm RHA-stål med två olika anslagshastigheter, 1.78 och 2.6 km/s [15]. För att samma anslagsenergi (2.88 MJ) skulle erhållas i respektive hastighet anpassades projektilernas absoluta storlek, dvs en större projektil (längd 494 mm, diameter 16.5 mm) sköts med hastigheten 1.78 km/s och en mindre (längd 384 mm, diameter 12.8 mm) sköts i 2.6 km/s. Penetrationsdjupet i ett bakomvarande vittnespaket av RHA användes för att jämföra penetrationsförmågan hos restprojektilerna. Penetrationsdjupet var nästintill identiskt i de två fallen.

Resultaten visar att antalet splitтер ökar med hastigheten på projektilen. Med antalet splitтер ökar även penetrationsförmågan i vittnesplåtarna. Resultatet blir att skadeverkan ökar med ökande hastighet. Slutsatsen är att med en ökning av hastigheten från 1,75 till 2,6 km/s så fås en ökning av antalet splitтер, deras penetrationsförmåga samt deras spridningsvinkel.

Ari [18] genomförde fragmenteringsstudier med korta projektiler i en lättgaskanon och registrerade förloppet med fyra par röntgenblixtar placerade i två ortogonala plan. Initialt användes en fragmentuppfångare som bestod av 3 lager träfiberboard i samma vinkel som målplåten. Avsikten var att genom att mäta hålvolymen i fragmentuppfångaren skulle massan på splittren kunna bestämmas. Splittren var dock så små och hålkanalerna så smala att detta inte var möjligt. De övergick istället till att använda vittnesplåtar, som fotograferades med bakomliggande ljus. Dessa bilder skannades sedan in och massan hos splittren approximerades med hjälp av hålarean.

Hohler m.fl. har undersökt perforationen av stålplåtar med cylindriska stålfragment samt splitterbildningen efteråt i hastigheter kring 2-3 km/s [22]. Projektilerna har ett slankhetstal $L/D = 1.035$ och en massa på 51g. Fragmenten och målplåten är av 9SMn28 (automatstål) respektive C45 (maskinstål). Målplåten testas i tjocklekarna 20 och 30 mm. Man använder sig av en två-stegs lättgaskanon och anslag sker vinkelrätt. Projektilsnedställning på upp till 2 grader accepteras. Uppställningen bestod av en plåt för drivspegeluppfångning varefter röntgenfotografering sker med två blixtrar före målplåten. Efter perforation så fotograferas förloppet med tre röntgenblixtrar där två är vinklade snett framifrån och en direkt från sidan. Slutligen finns en vittnesplåt av C45. Resultaten visar att splittermolnen är sfäriska och att fragmenteringen ökar med hastigheten och är mindre för den tjockare plåten. Man har valt att karakterisera splittren med kvoten mellan avståndet från plåten och den maximala laterala diametern på splittermolnet.

En annan undersökning där förloppet fotograferas snett för att erhålla den spatiala utbredningen redovisas i [22]. Uppställningen bestod av en plåt för drivspegeluppfångning efter vilken fotografering skedde med två röntgenblixtrar före målplåten. Efter perforation fotograferades förloppet med tre röntgenblixtrar där två var vinklade snett framifrån och en direkt från sidan.

Kipp m.fl. [30] gjorde försök där fragmenteringen av sfäriska stålprojektiler med diameter 6.35 mm undersöktes. Målmaterialet var av plast, PMMA (polymetylmetakrylat) med en nominell densitet på 1186 kg/m^3 , då detta är lätt att särskilja från projektilmaterialet. Förloppet studerades vid två stationer placerade ca 150 och 300 mm bakom målplåten. Två 150 kV röntgenblixtrar placerades ungefär 400 mm från skottlinjen. Röntgenfilmen, en Kodak Direct Exposure film med en Quanta Fast Detail screen, var placerad ca 100 mm från fragmentens bana. Vid två av försöken vinklades röntgenrustningen så att den spatiala distributionen kunde studeras. I övriga försök fotograferades förloppet vinkelrätt mot banan. Som vittnesplåt användes en plåt av aluminium (6061-T6) med tjocklek 6.35 mm eller 12.7 mm. vittnesplåten placerades ca 400 mm bakom målplåten.

Grady m.fl. [31] utvidgade studien i [30] med några fler målmaterial (plast, glas och aluminiumoxid). Syftet var att öka impulsen i förloppet. De använde en lättgaskanon och förloppet registrerades med två 150 kV röntgenblixtrar som placerades ca 400 mm från skottlinjen för att dokumentera fragmentens utbredningsområde.

Stilp [32] studerade fragmenteringen av skiktade målmaterial och jämförde materialen då man bytte inbördes ordning på de olika limmade skikten. Sfärer med diametrarna 5 mm och 10 mm användes i hastigheter mellan 3-8 km/s och förloppet registrerades med mjuk röntgen och bildomvandlingskameror. Vittnesplåt användes både framför målet (med ett hål i) och bakom målet. Vittnesplåtarna var 15 mm tjocka stålplåtar för fullskaleförsöken och 3 mm tjocka kopparplåtar för halvskaleförsöken.

Orphal [26] har undersökt sfäriska projektilers fragmentering vid vinklade anslag (60° - 80°). Fragmenten fångades upp i en aluminiumlåda fylld med mikrokristallint vax som kylts ned till 60 - 80° F och stelnat. Den nominella densiteten hos vaxet vid 75° F var 0.93 g/cm^3 . Efter försöken avlägsnades aluminiumlådan och placerades i en ugn där vaxet smälte så att fragmenten kunde samlas in och analyseras.

Piekutowski [20] studerade fragmenteringens beroende av projektilens form. Sfäriska projektiler av aluminium användes och jämfördes med olika ickesfäriska projektiler av aluminium och zink, enligt tabellen nedan. Plåtar med olika tjocklekar av aluminium och zink användes som mål. Förloppet studerades med hjälp av fyra par röntgenblixtrar. Ett av röntgenblixtparen användes för att registrera projektilen före anslag och övriga tre par användes för att studera fragmentmolnet och projektilen efter anslag.

Slutsatserna av denna undersökning var att den, i dessa sammanhang, så ofta använda sfären ger mindre effekt vid jämförelse med andra projektilformer.

Slutsatser

Då denna studie främst behandlar fragmenteringsprocesser i lägre hastighetsintervall är sammanställningen av slutsatserna från ovanstående undersökningar begränsad.

- Utseendet på splittermolnet påverkas av projektilens geometri, anslagsvinkeln, projektil- och målmaterial samt anslagshastigheten
- Antalet splitter, deras spridningsvinkel och penetrationsförmåga ökar med hastigheten på projektilen

Diskussion och förslag på experimentell studie

Det framgår av denna litteraturstudie att det endast finns ett fåtal publicerade studier där fragmenteringsprocesser i lägre projektilhastigheter (upp till 1000 m/s) behandlas i detalj. Å andra sidan finns viktiga experimentella metoder för sekundärsplitterstudier väl beskrivna även om dessa undersökningar oftast genomförts vid högre anslagshastigheter. Några generella slutsatser från litteraturen är att fragmenteringen ökar med ökande hastighet och ökande hårdhet hos målmaterialiet. Vissa studier tyder även på att antalet fragment ökar med minskande tjocklek hos målplåten. Dessa slutsatser är dock dragna utifrån relativt få experiment och en grundligare undersökning skulle ge ett mer tillförlitligt experimentellt underlag. Det finns inte heller någon systematisk studie av inverkan av experimentella osäkerheter, t ex projektilens snedställning. En snedställning hos projektilen ger sannolikt stor effekt på resultatet och om inte snedställningen registreras i försöken kan resultaten tolkas på ett felaktigt sätt.

En rimlig försöksserie skulle kunna vara att prova en väl utvald projektiltyp som är relevant för försvarsmakten mot ett, ur verkansvärderingssynpunkt, viktigt skyddsmaterial. Försöken planeras dock att initialt genomföras med sfäriska projektiler för att eliminera eventuella snedställningar samt då denna form är intressant i andra tillämpningar som tex IED (Improvised Explosive Device). Viktiga parametervariationer är variation av anslagshastigheten, måltjockleken, målmaterialiets hållfasthet samt vinkeln på målplåten i förhållande till skottlinjen. För att få ut maximalt med information ur varje experiment bör en kombination av olika experimentella utvärderingssystem väljas. Någon form av fotografering vore önskvärd och en närmre undersökning av möjligheten att registrera förloppet med hjälp av holografisk fotografering har initierats. Under 2006-2007 planeras initiala försök där försökstekniken med cylindriska hologram ska testas statistiskt i holografilabbet på KTH. Enkla ballistiska försök ska parallellt genomföras på FOI där den utvalda projektilen skjuts mot målet med en vittnesplåt bakom. Detta för att undersöka vilken radie den cylindriska filmen måste ha för att inte skadas. Det kan även bli aktuellt med någon form av skydd om radien skulle bli orimligt stor. Efter att dessa initiala försök genomförts och utvärderats kommer en försöksserie att inledas där utvalda försök genomförs med holografisk registreringsteknik. Kompletterande försök kommer att utföras i större omfattning med en enklare registreringsteknik. Vi kommer då att använda oss av vittnespaket i kombination med någon form av hastighetsregistrering, förmodligen i form av höghastighetsfotografering. En kamera för att registrera snedställning hos projektilen före anslag är under utveckling och förhoppningen är att denna ska vara färdigställd innan de slutgiltiga försöken inleds. Med denna planering hoppas vi uppnå dels systematiska försök med en enklare uppställning kombinerat med ett fåtal mer noggranna holografiskt registrerade försök. Kombinationen av dessa kommer förhoppningsvis att ge en rättvis bild av förloppet samt möjligheten att värdera enklare utvärderingsmetoder i förhållande till noggrannare men mer tidsödande. På detta sätt kan värdet av de undersökningar som finns publicerade erhållas samtidigt som viktiga erfarenheter om fragmenteringsprocessen erhålls.

Referenser

1. Ravid, M. and S.R. Bodner, *Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles*. International Journal of Engineering Science, 1983. **21**(6): p. 577-591.
2. Ravid, M., et al. *Characterization of the fragmentation exit failure mode and fragment distribution upon perforation of metallic targets*. in *20th international symposium on ballistics*. 2002. Orlando, Florida.
3. *Experimental methods for terminal ballistics and impact physics*, in *High velocity impact dynamics*, J.A. Zukas, Editor. 1990, John Wiley and Sons, Inc. p. 515-592.
4. Goldsmith, W. and S.A. Finnegan, *Penetration and perforation processes in metal targets at and above ballistic velocities*. International Journal of Mechanical Sciences, 1971. **13**(10): p. 843-850.
5. Finnegan, S.A., J.C. Schulz, and O.E.R. Heimdahl, *Spatial fragment mass and velocity distributions for ordnance and ultra-ordnance speed impacts*. International Journal of Impact Engineering, 1990. **10**(1-4): p. 159-170.
6. Hyzer, W.G., *Engineering and scientific high-speed photography*. 1962: The Macmillan Company, New York.
7. *Image forming instruments*, in *Impact dynamics*, J.A. Zukas, et al., Editors. 1982, John Wiley and Sons, Inc. p. 241-275.
8. Hohler, V., et al. *Debris cloud expansion around a residual rod behind a perforated plate target*. in *the 13th International Symposium on Ballistics*. 1992. Stockholm, Sweden.
9. J.H.Meulman. *Velocity distribution inside a behind armour debris cloud*. in *20th International symposium on ballistics*. 2002. Orlando, Florida.
10. Wilbeck, J.S. *Experience with Techniques for Characterizing Debris Generated During Hypervelocity Impact Testing*. in *AIAA Space Program and Technologies Conference*. 1992. Huntsville, AL.
11. Anderson, C., et al., *Measurement of Behind-Armor Debris using Cylindrical Holograms*. Opt. Eng, 1997. **36**: p. 40-46.
12. Ang, J.A. and B.D. Hansche, *Pulsed Holography Diagnostics of Impact Fragmentation*, in *High-pressure shock compression of solids II: Dynamic fracture and fragmentation*, L. Davison, D.E. Grady, and M. Shahinpoor, Editors. 1996, Springer-Verlag: New York. p. 176-193.
13. *Standardization agreement: Test procedures for measuring behind-armour effects of anti-armour ammunition*. 1998, NATO.
14. Verolme, J.L., M. Szymczak, and J.P.F. Broos, *Metallic witness packs for behind-armour debris characterisation*. International Journal of Impact Engineering, 1999. **22**: p. 693-705.
15. Anderson, C.E.J., et al. *Analysis of Behind Armor Debris at Two Impact Velocities*. in *15th International Symposium on Ballistics*. 1995. Jerusalem, Israel: Rafael - Armament Development Authority, Technion - Israel Institute of Technology.
16. Hironaka, Y., et al., *Fragmentation and dispersion of aluminum nitride ceramic plates by hypervelocity impact*. International Journal of Impact Engineering, 1997. **19**(4): p. 285-295.
17. Saravane, I. and A.E. Williams, *The size, velocity and trajectory of debris fragments produced by impact with plate targets*. International Journal of Impact Engineering, 1993. **14**(1-4): p. 607-618.
18. Ari, N. and J.S. Wilbeck, *Debris fragment characterization in oblique hypervelocity impacts*. International Journal of Impact Engineering, 1993. **14**(1-4): p. 37-48.
19. Akahoshi, Y. and T. Nakamura, *Construction of mass, three-dimensional and velocity distribution for the second debris clouds*. International Journal of Impact Engineering, 2001. **26**: p. 1-11.
20. Piekutowski, A.J., *Debris clouds produced by the hypervelocity impact of nonspherical projectiles*. International Journal of Impact Engineering, 2001. **26**(1-10): p. 613-624.
21. Riedel, W., et al. *Reduction of fragment effects behind layered armour experimental and numerical analysis*. in *21st International Symposium on Ballistics*. 2004. Adelaide.

22. Hohler, V., et al., *Experimental and numerical simulation of high velocity impact on steel targets*. International Journal of Impact Engineering, 1993. **14**(1-4): p. 325-334.
23. Gurson, A.L., *The effect of geometric scale on impact induced fragmentation, and its application to the design of dual plate armor*. International Journal of Impact Engineering, 1990. **10**(1-4): p. 213-229.
24. Hohler, et al. *X-ray cinematography and visar-interferometer measurements of rear side bursting during plate perforation*. in *7th International Symposium on Ballistics*. 1983. The Netherlands.
25. Yatteau, J.D. and R.F. Recht. *High Speed Penetration of Spaced Plates by Compact Fragments*. in *9th International Symposium on Ballistics*. 1986.
26. Orphal, D.L., *Highly Oblique Impact and Penetration of Thin Targets by Steel Spheres*. International Journal of Impact Engineering, 1999. **23**(1, Part 2): p. 687-698.
27. Yossifon, G., et al. *Characterization of the fragmentation exit and fragment distribution upon perforation of metallic targets of different hardness*. in *21st International Symposium on Ballistics*. 2004. Adelaide, Australia.
28. Finnegan, S.A., J.C. Schultz, and O.E.R. Heimdahl. *Fragmentation characterization technique for ordnance speed impacts*. in *Tenth International Symposium on Ballistics*. 1987. American Defense Preparedness Association, San Diego, CA.
29. Stilp, A.J., et al., *Debris cloud expansion studies*. International Journal of Impact Engineering, 1990. **10**(1-4): p. 543-553.
30. Kipp, M.E., D.E. Grady, and J.W. Swegle, *Numerical and experimental studies of high-velocity impact fragmentation*. International Journal of Impact Engineering, 1993. **14**(1-4): p. 427-438.
31. Grady, D.E. and M.E. Kipp, *Fragmentation properties of metals*. International Journal of Impact Engineering, 1997. **20**(1-5): p. 293-308.
32. Stilp, A.J. and K. Weber, *Debris clouds behind double-layer targets*. International Journal of Impact Engineering, 1997. **20**(6-10): p. 765-778.

Appendix

Appendix I: Jämförelse mellan olika STANAG vittnespaket

En jämförelse har gjorts mellan två olika vittnespaket som följer STANAG 4190 [13]. Paketet bestod av dels både aluminium och stål och dels enbart stål [14]. Om fragmenthastigheterna förväntas överstiga 1500 m/s rekommenderas stålpaketet. Innehållet i vittnespaketen kan ses i tabellen nedan där 25.4 mm frigolit finns mellan varje lager.

Tabell 1. Innehållet i två vittnespaket enligt STANAG 4190 [13]

| Lager | Blandpaket | | Stålpaket | |
|-------|---------------|------------|---------------|----------|
| | Tjocklek [mm] | Material | Tjocklek [mm] | Material |
| 1 | 1.0 | Al99.5 F11 | 0.8 | St12-3 |
| 2 | 1.0 | Al99.5 F11 | 1.5 | St37-2 |
| 3 | 3.0 | Al99.5 F11 | 1.5 | St37-2 |
| 4 | 1.5 | St37-2 | 3.0 | St37-2 |
| 5 | 1.5 | St37-2 | 3.0 | St37-2 |
| 6 | 1.5 | St37-2 | 6.0 | St37-2 |
| 7 | 1.5 | St37-2 | - | - |

Appendix II: Försök med HHS-plåtar och 7.62 mm AP M2

Tabell 2 visar materialegenskaperna för de använda materialen, där ρ är densitet, c ljudhastighet, s shock parameter, Γ Gruneisen parameter, C_p specifik värme, G skjuvmodul, Y statisk flytspänning, ε_f brottgränsen och K_{Ic} brottsegheten. Tabell 3 återger resultaten från försök med HHS-plåtar och 7.62 mm AP M2 som redovisas i [2].

Tabell 2. Materialegenskaper för mål- och projektilmaterial [2]

| | Material | ρ [g/cm ³] | c [m/s] | s | Γ | C_p [J/kg*K ^o] | G [GPa] | Y^* [MPa] | ε_f^* [%] | K_{Ic} [MPa*m ^{1/2}] |
|-----------|----------|--------------------------------|--------------|------|----------|---------------------------------|--------------|----------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Projektil | St4340 | 7.85 | - | - | - | - | 81.8 | - | - | - |
| Mål | HHS | 7.86 | 4610 | 1.73 | 1.67 | 477 | 64.1 | 1550 | 12 | 100 |

*=Experimentellt uppmätta värden

Tabell 3. Resultat från försök med HHS-plåtar och 7.2 mm AP M2 [2]

| Försök nr | Mål-tjocklek [mm] | Anslags-hastighet [m/s] | Antal fragment | Max konvinkel [°] | Total splitter-massa [mg] | Krater-diameter [mm] | Utgångs-diameter [mm] |
|-----------|-------------------|-------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 6.3 | 838 | 11 | 45.9 | 985.0 | 7.0 | 7.2 |
| 8 | 6.3 | 839 | 6 | 58.3 | 1190.0 | 7.0 | 10.6 |
| 9 | 6.3 | 856 | 6 | 59.9 | 942.0 | 7.0 | 11.0 |
| 2 | 7.9 | 840 | 6 | 68.7 | 1790.0 | 7.0 | 11.0 |
| 6 | 7.9 | 853 | 9 | 71.5 | 2760.0 | 8.0 | 12.0 |
| 7 | 7.9 | 857 | 7 | 64.8 | 2046.0 | 8.0 | 11.3 |
| 3 | 10.2 | 842 | 4 | 65.0 | 1860.0 | 6.0 | 11.8 |
| 4 | 10.2 | 846 | 2 | 62.7 | 1080.0 | 6.3 | 10.8 |
| 5 | 10.2 | 846 | 2 | 54.8 | 1380.0 | 7.6 | 10.8 |

Appendix III: Försök med olika stålplåtar och 7.62 mm AP M2

Tabell 4 visar materialegenskaperna för de använda materialen, där ρ är densitet, c ljudhastighet, s shock parameter, Γ Gruneisen parameter, C_p specifik värme, G skjuvmodul, Y statisk flytspänning, ϵ_f brottgränsen och K_{Ic} brottseghet. Tabell 5 återger resultaten från försök med stålplåtar och 7.62 mm AP M2 som redovisas i [27].

Tabell 4. Materialegenskaper för mål- och projektilmaterial [27]

| | Material | ρ [g/cm ³] | c [m/s] | s | Γ | C_p [J/kg*K°] | G [GPa] | Y^* [MPa] | ϵ_f^* [%] | K_{Ic} [MPa*m ^{1/2}] |
|-----------|----------|--------------------------------|--------------|------|----------|--------------------|--------------|----------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Projektil | St4340 | 7.85 | - | - | - | - | 81.8 | - | - | - |
| Mål | RHA | 7.86 | 4610 | 1.73 | 1.67 | 477 | 64.1 | 930 | 19 | 140 |
| | HHS | 7.86 | 4610 | 1.73 | 1.67 | 477 | 64.1 | 1550 | 12 | 100 |
| | UHH | 7.86 | 4610 | 1.73 | 1.67 | 477 | 64.1 | 2000 | 6 | 60 |

*=Experimentellt uppmätta värden

Tabell 5. Resultat från försök med stålplåtar och 7.2 mm AP M2 [27]

| Måltyp | Skottnr | Måltjocklek [mm] | Anslags- hastighet [m/s] | Antal fragment | Max konvinkel [°] | Total fragment massa [mg] | Krater- diameter [mm] | Utgångs- diameter [mm] |
|--------|---------|---------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| RHA | 1 | 8.0 | 833 | I.F | 0 | - | 5.7 | 5.7 |
| | R2 | 8.0 | 837 | I.F | 0 | - | 5.6 | 5.6 |
| | R3 | 8.0 | 837 | I.F | 0 | - | 5.8 | 5.8 |
| HHS | H2 | 7.9 | 840 | 6 | 69 | 1790 | 7.0 | 11.0 |
| | H6 | 7.9 | 853 | 9 | 72 | 2760 | 8.0 | 12.0 |
| | H7 | 7.9 | 857 | 7 | 65 | 2046 | 8.0 | 11.3 |
| UHH | U5 | 8.9 | 838 | 16 | 35 | 1984 | I.R | I.R |
| | U6 | 8.9 | 829 | 21 | 41 | 2340 | 6.2-8.1 | 6.2-8.1 |
| | U7 | 8.9 | 842 | 8 | 46 | 2156 | 6.8-9.6 | 6.8-9.6 |

I.F.=Inga fragment

I.R.=Ingen registrering