



Fragmentering och utkast av splitter

MARTIN NILSSON

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 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, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Försvars- och säkerhetssystem
Grindsjöns forskningscentrum
147 25 Tumba

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se

FOI-R--3097--SE Metodrapport
ISSN 1650-1942 December 2010

Försvars- och säkerhetssystem

Martin Nilsson

Fragmentering och utkast av splitter

Titel	Fragmentering och utkast av splitter
Title	Fragmentation and throw of fragments
Rapportnr/Report no	FOI-R--3097--SE
Rapporttyp Report Type	Metodrapport/Methodology Report
Sidor/Pages	24 p
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2010
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Projektnr/Project no	E20511
Godkänd av/Approved by	Patrik Lundberg

FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Försvars- och säkerhetssystem	Defence & Security, Systems and Technology
Grindsjöns forskningscentrum	
147 25 Tumba	SE-147 25 Tumba

Sammanfattning

Målet med detta arbete är att i en rapport sammanfatta alla delar av kedjan från stridsdel till verkansbeskrivning. För varje länk i kedjan görs ett försök till sammanställning av dels existerande metoder och dels kunskapsluckor och förslag på framtida arbete. Rapporten behandlar inte frågor kring risk och sårbarhet hos system eller människa.

I rapporten behandlas kortfattat skillnaderna mellan förfragmentering, styrd fragmentering och naturlig fragmentering och primära och sekundära splitter. Vidare beskrivs provningsmetoder och modeller för fragmentering, utkastningsvinklar och -hastigheter, luftbromsning och penetration. I ett separat kapitel sammanställs olika standarder och specifikationer rörande splittersimulatorer.

En målsättning är att löpande uppdatera denna rapport.

Nyckelord: splitter; fragmentering; experiment; modeller

Summary

The aim with this report is to summarise all steps in the process from warhead to lethality model. For each part of the process existing methods and models are described, gaps of knowledge identified and proposals for future work made. The report does not cover the areas of risk and vulnerability of systems and humans.

The report briefly describes the difference between natural fragmentation, controlled fragmentation and pre-fragmented warheads and primary and secondary fragments. Further examples of the methodology and modelling of fragmentation, projection angles, velocity, retardation and penetration are described and discussed. In a separate chapter standards and specification regarding fragment simulators are compiled.

The aim is to continuously update this report.

Keywords: fragments; fragmentation; experiments; models

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Introduktion	7
1.2	Avgränsningar	7
1.3	Definitioner	7
2	Splitterstridsdelar	9
3	Fragmentering	10
3.1	Analytiska och empiriska modeller.....	10
3.2	Experimentella metoder	11
3.3	Förslag på framtida arbete	12
4	Utkastningsvinkel och -hastighet	13
4.1	Analytiska och empiriska modeller.....	13
4.2	Experimentella metoder	13
4.3	Förslag på framtida arbete	16
5	Andra försök	17
5.1	Arenaförsök.....	17
6	Luftbromsning	18
6.1	Analytiska och empiriska modeller.....	18
6.2	Förslag på framtida arbete	18
7	Penetration	19
7.1	Analytiska och empiriska modeller.....	19
7.2	Sammanställningar av penetrationsdata	20
7.3	Förslag på framtida arbete	20
8	Splittersimulatorer	21
8.1	Standarder och specifikationer	21
8.2	Förslag på framtida arbete	24

1 Inledning

1.1 Introduktion

Målet med detta arbete är att i en rapport sammanfatta alla delar av kedjan från stridsdel till verkansbeskrivning. För varje länk i kedjan – kapitlen 3-7 enligt nedan – görs ett försök till sammanställning av dels existerande metoder och dels kunskapsluckor och förslag på framtida arbete.

Eftersom fragmenteringen av en stridsdel beror på material, geometri och sprängämne kommer den även att variera längs stridsdelens längd. För en artillerigranat kommer exempelvis området runt tändröret att ha låg sprängämnesbelastning och ge upphov till stora splitter, mittdelen – med hög sprängämnesbelastning – att ge mindre splitter och botten typiskt att ge större splitter. Experimentella metoder ger framförallt en splitterfördelning för hela stridsdelen och därför finns även efter experimentella studier ett behov av att med passräkning analysera vilken splitterfördelning varje del av stridsdelen ger. Tillsammans med information om utkastningshastigheter och –vinklar och luftbromsning och penetration kan man då ta fram en modell som kan användas för studier av verkan, sårbarhet och risk.

En målsättning är att löpande uppdatera denna rapport.

1.2 Avgränsningar

Rapporten behandlar inte frågor kring:

- Risk.
- Sårbarhet hos system eller människa.

1.3 Definitioner

Tabell 1. Definitioner.

Begrepp	Definition
BAD	Behind Armour Debris. BAD är sekundära splitter som bildas av projektil eller RSV-stråle och skyddsmaterialet när skyddet perforeras.
FEM	Finita elementmetoden.
FSP	Fragment Simulating Projectile. FSP används i en del sammanhang för att beteckna vilken geometri som helst som används för att simulera verkan av riktiga splitter men bör enbart användas om cylindriska splitter med mejselformad nos avsedda att skjuta ur eldrör. Diskussion om splittersimulatorer, kapitel 8, s 21. Det finns flera standarder och specifikationer från NATO ¹ (STANAG ²) och USA ³ .
Normalt anslag	Normalt anslag definieras som 0°. Sneda anslag definieras som vinkel mot normalvektorn (NATO-vinkel).

¹ "Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles. Volume 2 for mine threat", NATO Standardization Agency, AEP-55, NATO Unclassified, 2006.

"Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing", NATO Standardization Agency (NSA), STANAG 2920 (Edition 2), NATO Unclassified, 2003.

² STANAG – Standardization Agreement.

³ "Projectile, calibers .22, .30, .50 and 20 mm fragment-simulating", US Department of Defence, MIL-DTL-46593B (MR), 2006.

Begrepp	Definition
Perforation	Se "Perforationsvillkor"
Perforationsvillkor	<p>För att avgöra om splitter slagit igenom (perforerat) en skyddskonstruktion behövs noggrant fastställda perforationsvillkor.</p> <p>De tre vanligaste är:</p> <p>Army⁴.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fullständig penetration (CP) sker om ljus kan passera genom hål eller sprickor i målet eller om projektilen fastnat i målet och kan ses från baksidan. <p>Navy⁴.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fullständig penetration (CP) sker om hela eller större delen av projektilen har passerat genom pansarmodulen. Navy-kriteriet har bäring på större stridsdelar, exempelvis sjömålsgranater mot tungt bepansrade fartyg. <p>Protection⁴.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fullständig penetration (CP) sker om det finns hål i vittnesplåten oavsett vad som orsakat hålet – exempelvis kan fragment från målmaterialet (sekundärsplitter) slås loss även om primärprojektilen inte perforerat skyddet. Protection är det kriterium som i standarder för v50BL(P)⁵ och stopp⁶. <p>Av definitionen framgår att Protection-kriteriet endast kan användas bakom ett mål eftersom vittnesplåten annars kommer att påverka det man vill mäta.</p> <p>För provning av glasrutor⁷ finns ytterligare perforationskriterier.</p> <p>Vid redovisning av skjutresultat bör man eftersträva att enbart använda Army- och Protection-kriteriet och i alla fall där det är tillämpligt bör Protection-kriteriet användas.</p>
RCC	Right Circular Cylinder. En rät cylinder är en cylinder med cirkulär basyta och parallella ändytor.

⁴ "Ballistic tests of armor materials", US Army Test and Evaluation Command, Aberdeen, MD, TOP 2-2-710 (ADA137873), 1984.

⁵ "V₅₀ ballistic test for armor", Department of Defense, USA, MIL-STD-662F, 18 December 1997

"Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing", NATO Standardization Agency (NSA), STANAG 2920 (Edition 2), NATO Unclassified, 2003

"Test procedures for armour perforation tests of anti-armour ammunition", NATO, STANAG 4164 (Edition 2), NATO Unclassified, 1998.

⁶ "Protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles", NATO Standardization Agency, STANAG 4569 (Edition 1), NATO Unclassified, 2004

"Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles", NATO Standardization Agency, AEP-55, NATO Unclassified, 2005

⁷ "Glass in building - Security glazing - Testing and classification of resistance against bullet attack", SS EN 1063:2000, 2000

2 Splitterstridsdelar

Splitter genereras i princip från alla typer av stridsdelar. Splittren är antingen primära splitter från stridsdelar som är optimerade för splittergenerering eller splitter från laddningar med annan primärverkan (tryckverkan eller penetration). Sekundära splitter bildas av skyddsmaterialet när projektiler eller andra typer av penetrerande verkansdelar penetrerar och perforerar olika typer av skyddsmaterial.

Stridsdelar som verkar via splitter brukar vanligtvis delas upp i tre grupper:

- Förfragmentering.
 - Splittren är formade redan innan laddningen detonerar – ofta eftersträvas många och små splitter för att ge hög träffsannolikhet. Kulor, kuber eller andra geometrier packas i ett skal runt explosivämnet. En förfragmenterad laddning har sämre strukturell hållfasthet och för att kunna skjutas ut en sådan stridsdel ur ett eldrör kombineras den ofta med ett naturligt fragmenterande metallskal. Om kraven på hållfasthet är begränsade kan splittren gjutas in i exempelvis metallpulver eller plasthöljen. Genom förfragmentering går det att styra splitterstorleken men utkastningshastigheten blir lägre och kostnaden högre än för en naturligt fragmenterande stridsdel. Ett speciellt fall av förfragmenterade splitter är flechetter, det vill säga darpilslänkande projektiler. Ofta är dessa projektiler mycket små och avsedda att ge verkan mot oskyddad trupp. Typiskt exempel är truppminor och försvarsladdningar med ett skal av stålkulor, exempelvis ryska MON-50, amerikanska M18 Claymore och svenska försvarsladdning 21, samt luftvärnsgranater och moderna offensiva handgranater med ett stort antal små stålkulor.
- Styrd fragmentering.
 - Genom att göra anvisningar i det splittergenererande skalet eller variera sprängämnesbelastningen kommer fragmenteringen att styras till en viss storlek. Styrd fragmentering kommer också att ge ett stort antal splitter av annan storlek – företrädesvis mindre. Typiskt exempel är ananas-handgranater, som den ryska F1 och den amerikanska Mk 2.
- Naturlig fragmentering.
 - Om inga metoder används för att styra fragmenteringen kommer stridsdelen att ge en fördelning av olika splitterstorlekar. Fördelningen kommer att styras av geometri, explosivämne och skalets materialegenskaper. Typiskt exempel på stridsdelar med naturlig fragmentering är traditionella artillerigranater, exempelvis de svenska spränggranaterna m/54 och m/77.

För att kunna dimensionera skydd, uppskatta verkan i målet, ett måls sårbarhet eller risk för egen trupp eller tredje man är det nödvändigt att karakterisera splitterdata från stridsdelen. Karakteriseringen innebär i huvudsak att fastställa splittrens massfördelning, utkastningshastighet och -riktning, splitterform och materialets densitet samt hållfasthet.

3 Fragmentering

3.1 Analytiska och empiriska modeller

Stora och tidiga bidrag görs av Mott⁸ som tar fram ett uttryck som beskriver en rings fragmentering och splitters längd i omkretsledd. Som indata behövs materialdata för ringarna, dimensioner hos skalet och skalets expansionshastighet. Arbetet med modeller för fragmentering har senare drivits vidare i Sverige av bland annat Lundberg⁹. Internationellt fortsätter arbetet kring fragmentering och har resulterat i ett antal rapporter och artiklar¹⁰.

I tidigare arbeten i Sverige har för stridsdelar mindre än 200 mm Hörners¹¹ fragmenteringsekvation använts,

$$M(m_1 < m < \infty) = M_0 \exp(-\gamma m_1) \quad \text{och} \quad (1)$$

$$N(m_1 < m < \infty) = \gamma M_0 \int_{m_1}^{\infty} \frac{\exp(-\gamma m_1)}{m} dm \quad \text{där} \quad (2)$$

$M(m_1 < m < \infty)$ är massan av samtliga splitters med massa större än m_1 , $N(m_1 < m < \infty)$ är det totala antalet splitters med massa större än m_1 , M_0 är det ursprungliga splittermaterialets massa och γ är fragmenteringstalet,

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-0,264D - 15,8 \frac{t}{D}\right) \quad \text{där} \quad (3)$$

γ_0 är en faktor som beror av sprängämnet och höljesmaterialet men inte av geometri, D är höljets ytterdiameter i cm och t är höljets godstjocklek i cm. Motivationen kring Hörners fragmenteringsekvation anges vara att den ger bättre samstämmighet med experiment för små splitters.

Datorbaserade verktyg i form av traditionella FEM-program¹² är inte direkt användbara för att beräkna fragmentering av splittergenererande stridsdelar. Fragmenteringen i det verkliga fallet är styrd av fel och inhomogeniteter – på mycket liten skala – i materialet och anvisningar i form av exempelvis svarvspår. I en FEM-modell kommer elementstorleken att styra fragmenteringen. För verkan av sekundärsplitters (BAD¹³) kan metoder där skadade element i FEM-modellen görs om till partiklar med massa och hastighet vara mycket användbara¹⁴.

⁸ Mott publicerar två rapporter om fragmentering och dessa sammanfattas senare i en vetenskaplig artikel; «N. F. Mott, "Fragmentation of Shell Cases", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 189, s. 300-308, 1947».

⁹ För en sammanställning se «Bo Janson, "Grundläggande stridsdelfysik", FOA, Stockholm, FOA C 20261-D4, 1978».

¹⁰ Det finns ett stort antal förslag till fragmenteringsmodeller och flera av dessa och de resulterande storleksfördelningarna jämförs i «Predrag Elek och Slobodan Jaramaz, "Size Distribution of Fragments Generated by Detonation of Fragmenting Warheads", 23rd International Symposium of Ballistics, Tarragona, 2006».

¹¹ Sven Hörner och Evert Kemgren, "Metoder för bestämning av en granats fragmentering och splitters hastighet och riktning", FOA, Stockholm, Stockholm, FOA C 2196-44, 1976

¹² FEM – Finita elementmetoden.

¹³ BAD – Behind Armour Debris. BAD är sekundära splitters som bildas av projektil eller RSV-stråle och skyddsmaterialet när skyddet perforeras. För en genomgång av experimentella metoder se «Irina Eriksson, "Sekundärsplitters: Experimentella metoder - en litteraturstudie", FOI, Stockholm, FOI-R--2105--SE, 2006». För NATO-standard se "Test procedures for measuring behind-armour effects of anti-armour ammunition", NATO Standardization Agency (NSA), STANAG 4190 Edition 2 (NATO Unclassified), 1998».

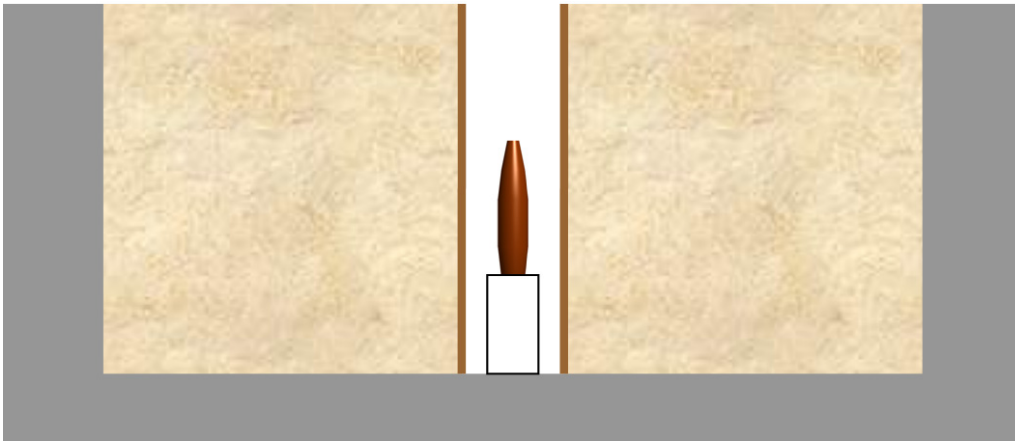
¹⁴ Se exempelvis «G. R. Johnson, et al., "Advanced Computations for Ballistic Impact Problems", Network Computing Services Inc, Minneapolis, MN, ADA433298, 2004».

Ett datorstöd som kan användas för studier av fragmentering är SplitX¹⁵ som utifrån en modell av stridsdelen använder empiriska modeller för att beräkna fragmentering.

3.2 Experimentella metoder

Sprängning av en stridsdel i en sprängtrumma är den vanligaste metoden för att bestämma splittrens massfördelning och form. Sprängtrumman är i princip en stor behållare där stridsdelen placeras centrerat och som innehåller ett bromsande medium där splittren samlas upp.

Vid försök i sprängtrumma placeras stridsdelen med spetsen uppåt på ett block av lätt plastskum eller liknande i sprängtrummans centrum och omges närmast av en luftvolym för att tillåta ostörd expansion, se figur 1.



Figur 1. Sprängtrumma.

Vanligt är att använda sågspån¹⁶ för att fånga upp splittren. Sprängtrumman kan även byggas för att innehålla vatten men måste då vara kraftigare konstruerad eftersom vatten inte dämpar stötvågen från laddningen lika mycket som sågspån. Även vid försök i vatten måste stridsdelen omges av luft och för att göra uppbromsningen av splitter mjukare kan luftbubbelridåer i vattnet användas.

I vissa utländska studier används sand¹⁷. För stora stridsdelar – exempelvis flygbomber – kan halm¹⁸ vara ett användbart alternativ. Efter sprängförsöket eldas halmen upp och den mindre askmängden söks igenom.

Efter försöket – oberoende av vilken uppfångningsmetod som används – måste alla splittren samlas upp och vägas styckvis.

För att få information om variationen av fragmentering längs stridsdelens längd används de analytiska och empiriska uttrycken, kap 3.1, för att få överensstämmelsen mellan experiment och beräkning.

¹⁵ <http://www.numerics-gmbh.de/en/split-x.html>.

¹⁶ Se exempelvis «Fritiof Lithén, »Sprängtrumma för fragmenteringsundersökning, dess konstruktion och användning», FOA, Stockholm, FOA C 2444-44, 1970».

¹⁷ «Berko Zecevic, et al., »Analysis of influencing factors of mortar projectile reproduction process on fragment mass distribution», 13th Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials», University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic, 2010» och «Berko Zecevic, et al., »Influencing Parameters on HE Projectiles with Natural Fragmentation», 9th Seminar «New Trends in Research of Energetic Materials», University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic, 2006».

¹⁸ J. Terrence Klopocic, »An Efficient Technique for the Collection and Analysis of Fragment Mass Distributions from Fragmenting Munitions», Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Grounds, MD, ARL-TR-1271 (ADA320043), 1996.

Det är möjligt att fånga splitter med hjälp av träfiberskivor – ”Tretex” – och sedan plocka ut varje splitter ur boardpacken, mäta penetrationsdjupet¹⁹ och i viss mån anslagsvinkel.

3.3 Förslag på framtida arbete

Den sprängtrumma som finns vid FOI Grindsjön använder sågspån och är dimensionerad för stridsdelar med upp till 8 kg sprängämne²⁰. Ingen ytterligare utveckling krävs efter den modernisering som genomförts 2010.

Det finns ett behov av att studera de i litteraturen publicerade fragmenteringsmodellerna och de därmed förknippade storleksfördelningarna. En sådan studie skulle kunna genomföras på äldre data²¹.

Ett problem som noterats är att fragmentering av de delar av stridsdelen som inte är direkt belastat med explosivämne – exempelvis runt tändrör och delar av botten – inte kan beräknas med existerande modeller. Fragmenteringen av botten är framförallt viktig vid riskberäkningar.

¹⁹ Om penetrationsdjupet mäts går det att – åtminstone grovt – beräkna hastigheten hos splittret, se kap. 0 för referenser om mjuka uppfångningsmaterial.

²⁰ Fritiof Lithén, ”Sprängtrumma för fragmenteringsundersökning, dess konstruktion och användning”, FOA, Stockholm, FOA C 2444-44, 1970.

²¹ En stridsdel som skulle kunna studeras är sgr m77, «Anders Andersson och Fritiof Lithén, ”Splitterdata för 15,5 cm sgr m/77 med trotyl alternativt hexotol 60/40”, FOA, Stockholm, FOA C 20671-2.3, 1987».

4 Utkastningsvinkel och -hastighet

4.1 Analytiska och empiriska modeller

Liksom för fragmentering gjordes mycket analytiskt arbete rörande utkastningsvinkel och -hastighet vid amerikanska och brittiska laboratorier under det tidiga 40-talet. De uttryck som tagits fram gäller för fortvarighetstillstånd, d.v.s. detonationsvågen antas röra sig genom en lång, likformig cylinder, och bör bekräftas med försök.

För att beräkna utkastningshastigheten hos fragment från en sprängämnesfylld cylinder kan Gurney-ekvationen²²,

$$v = \sqrt{2E} \left(\frac{M/m}{1 + \frac{1}{2} M/m} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

användas. I (4) betecknar v utkastningshastigheten, $\sqrt{2E}$ sprängämnets så kallade Gurney-hastighet, M sprängämnets massa och m höljets massa. Gurney-ekvationen finns även för andra laddningsgeometrier. Det finns ett stort antal modifieringar och förbättringar av de ursprungliga Gurney-ekvationerna²³.

För att beräkna utkastningsriktningen kan Taylors utkastningsformel²⁴,

$$\sin \delta = \frac{v_0}{2U_D}, \quad (5)$$

användas. I (5) betecknar δ riktningen från normalen av ytan, v_0 splittrens utkastningshastighet och U_D sprängämnets detonationshastighet. Även för Taylor-ekvationen finns förslag till modifieringar och förbättringar²⁵.

För att beräkna utkastningsvinkel är FEM ett fungerande verktyg. Skalets hållfasthet har relativt liten påverkan på resultatet från tunna skal²⁵.

4.2 Experimentella metoder

Den bästa metoden för att mäta utkastningshastighet och -vinkel är blixtröntgen. Blixtröntgen medger korta exponeringstider och därmed liten rörelseoskärpa och störs inte av rök, ljus och luftstövågens utbredning. Flera exponeringar görs på samma bildplatta (flera blixtrar). Se även figur 2 och 3. För att underlätta beräkningen av splitterbanorna mellan de olika exponeringarna används bildbehandling och andra typer av datorstöd.

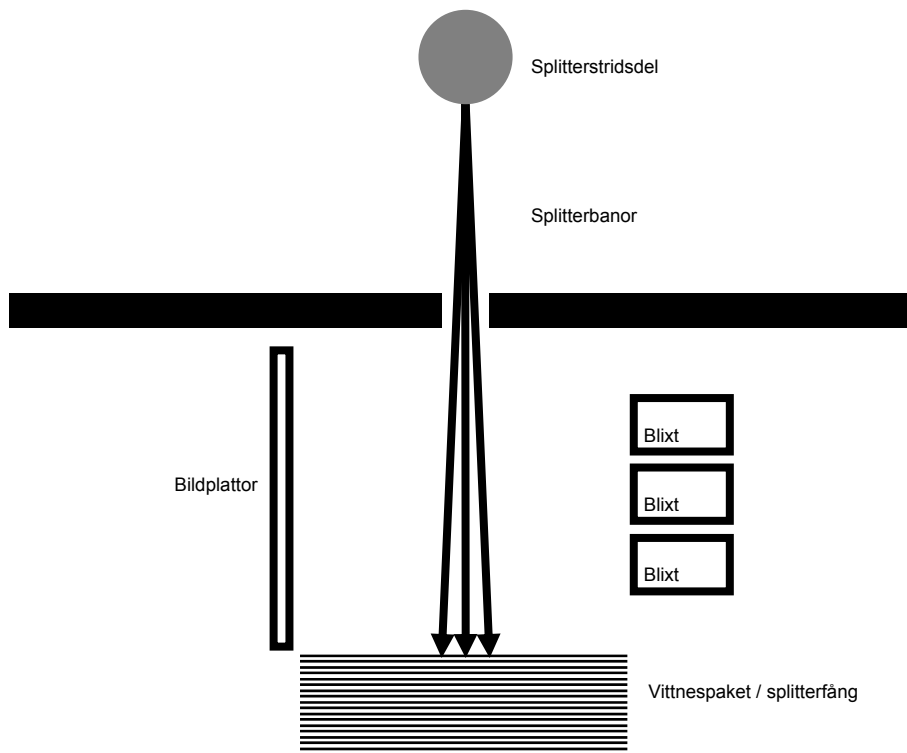
Stridsdelen placeras stående och detoneras, figur 2. Genom att använda en spalt begränsas den mängd splitter som passerar mellan blixtrar och film/bildplatta till ett hanterbart antal.

²² Ronald W. Gurney, "The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shell and Grenades", Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, BRL-405 (ADA800105, ADA289704), 1943.

²³ G. Randers-Pehrson, "An Improved Equation for Calculating Fragment Projection Angles", 2nd International Symposium on Ballistics, Daytona Beach, Florida, USA, 1976.

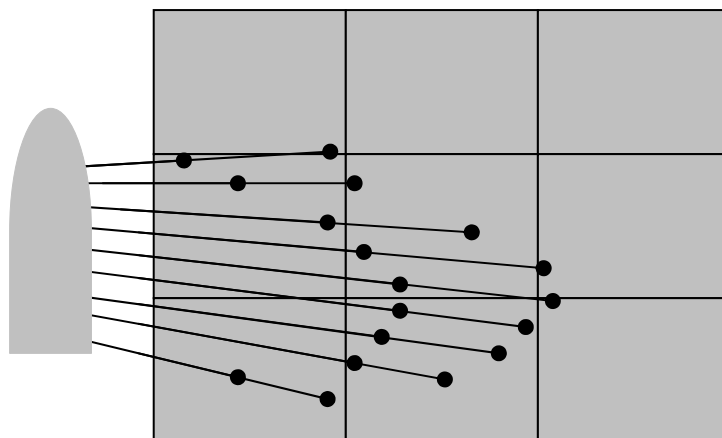
²⁴ Geoffrey Ingram Taylor, "Analysis of the explosion of a long cylindrical bomb detonated at one end" i *Scientific papers of G. I. Taylor*, vol. III. Cambridge: Cambridge University Press, 1963, s. 277-286.

²⁵ Cylinderförsök med stål: «D. M. Goto, et al., "Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, s. 1547-1556, 2008». Cylinderförsök med koppar: «Andreas Helte, et al., "Prestandabestämning av svensk sprängdeg m/46", FOI, Stockholm, (Teknisk rapport/Technical report), FOI-R--2051--SE, 2006».



Figur 2. Försökupställning för att registrera utkastningsriktning och -hastighet. Vy ovanifrån.

Genom att avbilda splitterskuren vid minst två tillfällen kan hastighet och riktning bestämmas, se principskiss i figur 3.

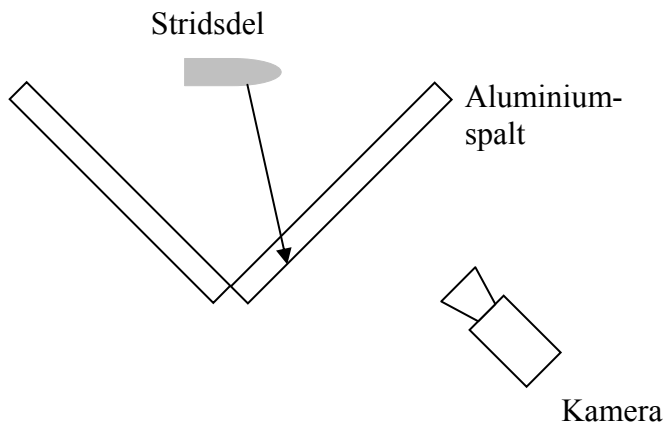


Figur 3. Kraftigt förenklad princip för registrering av utkastningsriktning och -hastighet. Vy från sidan. Notera att splitterskuren har ett djup i bildens normal.

För stora stridsdelar kan metoden med blixtröntgen vara omöjlig att använda. Ett alternativ kan då vara att använda en uppställning enligt figur 4. Vid ett areneförsök placeras ett paket bestående av 2 tunna aluminiumplåtar med distans²⁶. Plåtarna är svartmålade på den

²⁶ Dempsey använder en 0,05 mm tjock aluminiumfolie närmast laddningen och en 0,6 mm tjock aluminiumplåt närmast kameran med en distans av 12,7 mm «J. T. Dempsey, "Fragmentation of shell, HE, 115 mm, XM378 composition B loaded", Aberdeen Proving Ground, MD, DPS-TW-201-3 (AD0317119), 1960». Janzon beskriver inte plåtarna och plåttjockleken närmare «Bo Janzon, "Grundläggande stridsdelfysik", FOA, Stockholm, FOA C 20261-D4, 1978».

sida som riktas mot kameran och mellan plåtarna finns en stark ljuskälla. När splitter perforerar plåtpaketet syns en ljusblxt som registreras med kameran. För att få en korrekt tidpunkt för detonationen kan kameran fokuseras mot stridsdelen genom ett hål i plåtpaketet eller en elektrisk trigg-signal användas. Metoden kräver flera höghastighetskameror eller upprepade försök och är beroende av att utkastningsvinklarna kan bestämmas på ett annat sätt.



Figur 4. Hastighetsmätning med aluminiumspalter och höghastighetskamera. Förenklad uppställning

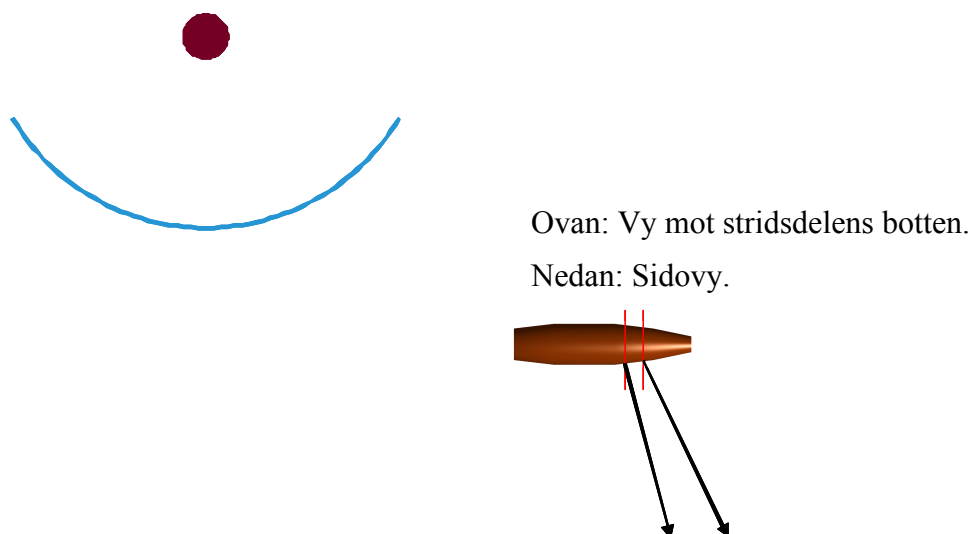
En enkel metod som använts bland annat vid försök med bilbomber är att filma splitterskuren mot en vit bakgrund. Metoden har givit blandade resultat och det är viktigt att de skärmar som skapar den vita bakgrunden inte skadas eller deformerar av stötvågen under den period som är intressant för att kunna registrera hastigheterna²⁷. I en studie²⁸ av fragmentering och kast av en betongkonstruktion användes enbart höghastighetsvideo. Enskilda splitter följdes bild-för-bild och med hjälp av referenser på provplatsen kunde hastigheterna beräknas. I detta fall var dock splittren mycket stora och utkastningshastigheterna låga.

En annan möjlighet är att använda fingerbleck och eller andra kortslutningsgivare kopplade till en transientrecorder för att registrera splitteranslag. Detonationen registreras på en separat kanal med hjälp av elektrisk trigg-signal kopplad till stridsdelen. För att få tillräcklig upplösning krävs många fingerbleck och många registreringskanaler.

²⁷ En mycket kortfattad redogörelse för denna typ av hastighetsmätningar görs i «Rickard Forsén, "KLOTZ-verksamhet under 2010", FOI, Stockholm, FOI Memo 3406, 2010».

²⁸ Roger Berglund, "Break up Tests with Small "Ammunition Houses" using cased charges - Kasun III", FOI, Stockholm, FOI-R--2749--SE, 2009

En metod²⁹ som använts under 60- och 70-tal är att göra ett speciellt spränggårdsförsök kombinerat med beräkningar. Spränggårdsförsöket beskrivs i figur 5 nedan.



Figur 5. Spränggårdsförsök för att fastställa fragmentering längs stridsdel. Tunn plåt böjd till cirkelsegment och granat hängande i plåtens krökningscentrum.

Det första steget är att dela upp stridsdelen i ett antal skivor. Utifrån kunskap om fragmenteringen – se kap 3 – och utkastningshastighet längs stridsdelens längd går det då att för varje skiva beräkna hur många splitter som kommer att perforera plåten. Följaktligen går det att reda ut vilket område av plåten som träffats av splitter från en viss del av stridsdelen. Metoden att bli relativt grov eftersom den bygger vidare på beräkningar av fragmenteringens fördelning längs stridsdelens längd. Ytterligare osäkerheter³⁰ kommer från luftbromsningen under flygsträckan och beroendet av anslagsvinkel.

4.3 Förslag på framtida arbete

För relativt små stridsdelar – åtminstone alla stridsdelar mindre än 155 mm spränggranat – är blixtröntgen en mycket väl fungerande teknik för att mäta både utkastningshastighet och -vinkel och kräver ingen ytterligare utveckling. Fortsatt utveckling bör göras kring de datorbaserade verktyg som används för att underlätta tolkningen av röntgenbilderna.

Ett problem som noterats är att utkastningsvinkel och -hastighet hos de delar av stridsdelen som inte är direkt belastade med explosivämne – exempelvis runt tändrör och delar av botten – inte kan beräknas med existerande modeller. Splitter från botten är framförallt viktig vid riskberäkningar.

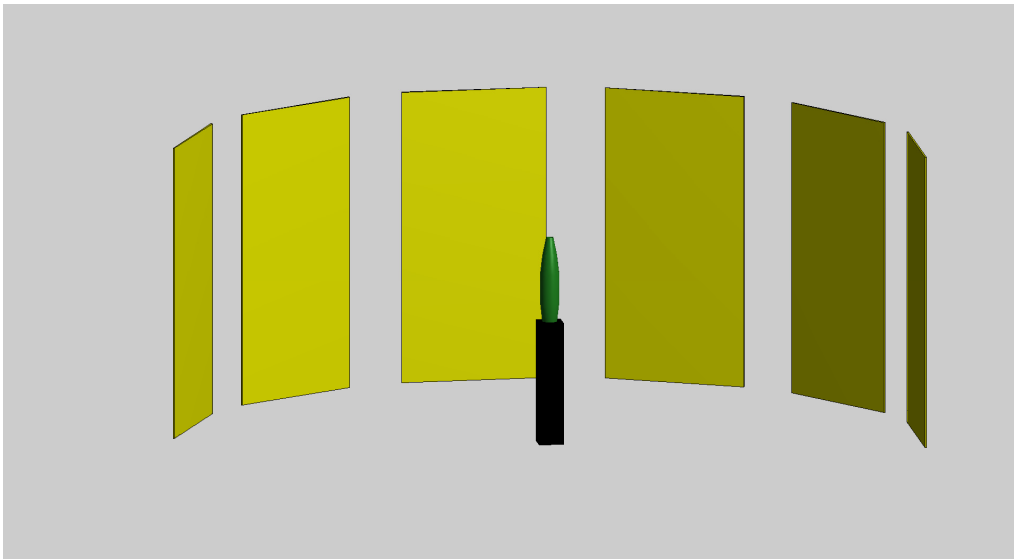
²⁹ Sven Hörner och Evert Kemgren, ”Metoder för bestämning av en granats fragmentering och splittrens hastighet och riktning”, FOA, Stockholm, Stockholm, FOA C 2196-44, 1976.

³⁰ Hörner ger en beskrivning av arbetsgången och diskuterar också inverkan av olika antaganden «Ibid».

5 Andra försök

5.1 Arenaförsök

Vid ett arenaförsök placeras stridsdelen stående eller liggande på en plan yta med målmaterial placerat på lämpligt avstånd runt om, se figur 6. Målmaterial kan t ex vara boardpaket för att fånga splitter i eller pansarplåtar eller andra skyddsmaterial för att mäta perforationsförmågan. Risker för att splitter rikoschetterar mot marken och påverkar resultatet bör beaktas och kan undvikas genom att bygga skyddsvallar framför målpaket som stoppar rikoschetter. Arenaförsök kallas även spränggårdsförsök eller, i vissa amerikanska rapporter, yankee stadium test³¹.



Figur 6. Arenaförsök.

³¹ Arenaförsök med liggande spränggranater i en rektangulär spränggård kallad yankee stadium, «J. T. Dempsey, "Fragmentation of shell, HE, 115 mm, XM378 composition B loaded", Aberdeen Proving Ground, MD, DPS-TW-201-3 (AD0317119), 1960». Beteckningen yankee stadium används även i TOP 2-2-722 om statisk detonation av HE-stridsdelar, "Fragment Penetration Tests of Armor", Army Test and Evaluation Command, Aberdeen Proving Ground, MD, TOP 2-2-722 (ADA125824), 1983.

6 Luftbromsning

6.1 Analytiska och empiriska modeller

Janzon³² sammanställer i litteraturen tillgängliga data för luftmotstånd hos olika splittergeometrier och ställer upp ett uttryck för splitterhastigheten,

$$v(x) = v_0 \exp(-k_0 x) \text{ där} \quad (6)$$

$$k_0 = \frac{k}{\sqrt[3]{m_s}} \text{ och där} \quad (7)$$

v_0 är utgångshastigheten, x är gångvägen, k definieras för olika geometrier i tabell 2 och m_s är splittermassan.

Tabell 2. k för splitter av stål.

Splitterform	Intervall	
	$M = 0,0-0,9$	$M = 0,9-10$
Sfär	0,00095	0,00180
Kub	0,00199	0,00274
Cylinder (diameter=längd)	0,00179	0,00244
Spränggranatsplitter	0,00264	0,00456

6.2 Förslag på framtida arbete

En ny litteraturundersökning av luftmotstånd är en intressant men lågt prioriterad aktivitet.

³² «Bo Janzon, "Underlag för verkansberäkningar. H5. Splitters luftmotstånd", FOA, Stockholm, FOA A 2539-44, 1971». En mer kortfattad version finns även i «Bo Janzon, "Grundläggande stridsdelfysik", FOA, Stockholm, FOA C 20261-D4, 1978» och «Kurt Andersson, et al., "Lärobok i militärteknik, vol. 4: Verkan och skydd": Försvarshögskolan, 2009.».

7 Penetration

7.1 Analytiska och empiriska modeller

Det finns ett mycket stort antal olika empiriska analytiska penetrationsmodeller men nedan presenteras kortfattat två modeller³³.

Rilbes formel³⁴ är framtagen för att kunna beräkna genomslag (perforation) och resthastighet för stålsplitter som penetrerar stål, stålpansar och aluminium enligt (8-9).

$$G(m, v) = G_0 m^{1/3} v \quad \text{respektive} \quad (8)$$

$$v_{res} = \left(\frac{G_{res}}{G_0} m^{-1/3} \right) v_0 \quad \text{där} \quad (9)$$

m är splittersmassan i kg, v är splittrets anslags hastighet i m/s, G_{res} är splittrets restpenetrationsförmåga det vill säga $G-t$ där t är perforerade plåttjockleken och G_0 en material- och projektilberoende konstant.

Rilbes formel finns införd i verkans- och sårbarhetsprogrammet AVAL med möjlighet att använda andra exponenter än $1/3$ och 1 för massa respektive hastighet,

$$G(m, v) = G_0 \left(\frac{m}{m_0} \right)^a \left(\frac{v}{v_0} \right)^b \quad \text{respektive} \quad (10)$$

$$v_{res}(m, v) = \left(\frac{G_{res}}{G_0} \left(\frac{m}{m_0} \right)^{-a} \right)^{1/b} v_0. \quad (11)$$

En annan likartad men något mer komplex penetrationsmodell är Thor-ekvationerna³⁵ som skrivna med SI-enheter beräknar penetrationsförmåga och resthastighet.

$$G(m, v) = \frac{\left[\frac{v_0}{0,3048 \cdot 10^{C_1} \cdot 15432,4^{\beta_1} \cdot m^{\beta_1}} \right]^{1/\alpha_1}}{0,061024A} \quad \text{respektive} \quad (12)$$

$$v_{res}(m, v) = v_0 - \frac{10^C \cdot (0,061024GA)^\alpha (15432,4m)^\beta (3,28084v_0)^\lambda}{3,28084} \quad (13)$$

med beteckningar enligt ovan och där A är medelvärde av splittrets anslagsyta i cm^2 och $C_1, \alpha_1, \beta_1, \alpha, \beta$ och λ är materialberoende konstanter. THOR-ekvationerna kan även ta hänsyn till anslagsvinkel – den termen saknas i ekvationerna ovan – och det finns även möjligheter att beräkna restmassan hos de splitter som perforerat strukturen.

³³ En sammanställning av ytterligare penetrationsmodeller finns i «Yngve Löfstrand, »Sammanställning av några fysikaliska samband avsedda för verkansmodeller», FOA, Stockholm, FOA C 20984-2.3, 1994».

³⁴ Ulf Rilbe, »Splitters genomslagsförmåga. Sammanställning av numeriska värden grundade på försök och beräkningar», FOA, Stockholm, FOA A 2525 - 44, 1976.

³⁵ «»The Resistance of Various Metallic Materials to Perforation by Steel Fragments; Empirical Relationships for Fragment Residual Velocity and Residual Weight», John Hopkins University, Ballistic Analysis Laboratory, Cockeysville, MD, BAL-TR-47 (AD0322781), 1961» och «»The Resistance of Various Non-Metallic Materials to Perforation by Steel Fragments; Empirical Relationships for Fragment Residual Velocity and Residual Weight», John Hopkins University, Ballistic Analysis Laboratory, Cockeysville, MD, BAL-TR-51 (AD0336461), Apr 1963».

7.2 Sammanställningar av penetrationsdata

Ett systematiskt arbete med att sammanställa olika typer³⁶ av penetrationsdata har påbörjats³⁷. Målet med arbetet är inte att skapa en databas i en kommersiell databashanterare utan att sammanställa textfiler som sedan kan behandlas med olika verktyg. Det går också att med de existerande verktygen skapa skriftliga rapporter.

Speciellt värt att notera är att det finns flera försöksserier publicerade med skjutförsök mot träfiberskivor³⁸. I en amerikansk studie³⁹ har ett plasticskum – Celotex – använts för att fånga splitter och sedan uppskatta korrelationen mellan hastighet och inträngningsdjup.

7.3 Förslag på framtida arbete

Arbetet med att generera experimentella data bedrivs inom flera organisationer i Sverige och hos ett mycket stort antal organisationer utomlands. Arbetet med att fortsätta generera och sammanställa experimentellt data kommer att fortsätta och det viktiga är att säkerställa att kvalitén på de data man producerar är god⁴⁰.

³⁶ För splittersimulatorer är framförallt v50-försök intressanta, oftast med perforationskriteriet "Protection" – detta betecknas då v50BL(P).

³⁷ Patrik Appelgren och Mats Hartmann, "Hotdatabas - Teknisk prestanda - Rapport 2010", FOI-RH--1035--SE, 2010.

³⁸ «L. Pettersson, "Stålsplitters inträngning i board", FOA, Stockholm, FOA A 2347-221, 1965» och «G. Wijk, et al., "Sphere penetration into gelatine and board", 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001».

³⁹ «W. R. Porter, "Radially expanding Fragmentation warhead study", Martin Co, Orlando, FL, ATLTDR-64-9, AD0348620, 1964». Celotex är enligt www.celotex.co.uk ett plasticskum av polyisocyanurat.

⁴⁰ För en genomgång av begreppet v50 se «Andreas Tyrberg, et al., "Standardiserat förfarande vid bestämning av gränshastighet för skydd, utgåva 0.9", FOI, Stockholm, (Metodrapport/Methodology Report), FOI-R--2321--SE, 2007». För diskussion om kvalitét hos v50 se: «John H. Graves och Hermann Kolev, "Joint Technical Coordinating Group on Aircraft Survivability. Interlaboratory Ballistic Test Program", ARL, USA, ARL-TR-755 (ADA297279), 1995» och «Albert L. Chang och Barry A. Bodt, "JTCG/AS Interlaboratory Ballistic Test Program", ARL, USA, ARL-TR-1577 (ADA335629), 1997».

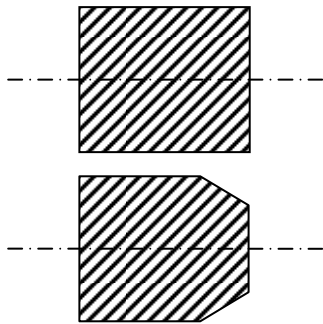
8 Splittersimulatorer

På grund av framförallt naturligt formade splitters oregelbundna form och storlek är det i många fall dyrt och olämpligt att använda en riktig stridsdel för utveckling av ballistiska skydd. För att på enhetligt sätt kunna kravställa och prova ballistiska skydd används därför olika splittersimulatorer.

I de flesta fall går det att geometriskt skala projektil-skyddskombinationer, det vill säga en cylinder med massan m och diameter d skjuten mot en stålplåt med tjockleken t ger samma utfall som en cylinder med massan $8m$, diametern $2d$ skjuten mot en stålplåt med tjockleken $2t$.

8.1 Standarder och specifikationer

Dimensioner hos FSP⁴¹ beskrivs i en amerikansk försvarsstandard, MIL-DTL-46593B⁴², i en NATO-standard, STANAG 2920⁴³ och den till STANAG 4569⁴⁴ hörande AEP-55⁴⁵. Dimensioner för FSP enligt MIL-DTL-46593B anges i tabell 3.



Figur 7. FSP (Fragment simulating projectile).

I STANAG 2920 beskrivs även andra splittersimulatorgeometrier; cylindrar – tabell 4, sfärer – tabell 5, kuber – tabell 6 och parallelepipedrar – tabell 7. I STANAG 2920 refereras även till brittiska FSP med liknande form som de amerikanska men med andra diametrar.

⁴¹ FSP – Fragment Simulating Projectile. FSP används i en del sammanhang för att beteckna vilken geometri som helst som används för att simulera verkan av riktiga splitter men bör enbart användas om cylindriska splitter med mejselformad nos avsedda att skjuta ur eldrör specificerade enligt fotnoterna 42 eller 43.

⁴² "Projectile, calibers .22, .30, .50 and 20 mm fragment-simulating", US Department of Defence, MIL-DTL-46593B (MR), 2006

⁴³ "Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing", NATO Standardization Agency (NSA), STANAG 2920 (Edition 2), NATO Unclassified, 2003

⁴⁴ "Protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles", NATO Standardization Agency, STANAG 4569 (Edition 1), NATO Unclassified, 2004

⁴⁵ "Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles", NATO Standardization Agency, AEP-55, NATO Unclassified, 2005

Tabell 3. Dimensioner hos FSP enligt MIL-DTL-46593B. För toleranser se MIL-DTL-46593B. Angiven diametern gäller den cylindriska delen. Längden justeras för att nå angiven massa.

Typ	Massa / grains	Massa / g	Diameter / mm	Längd / mm	Hårdhet / HRC
Kaliber .22 typ 1	17,0	1,10	5,461	(6,35)	30
Kaliber .22 typ 2	17,0	1,10	5,461	(6,35)	27
Kaliber .30	44,0	2,85	7,5184	(8,84)	30
Kaliber .50	207,0	13,41	12,573	(14,78)	30
20 mm	830,0	53,78	19,9136	(23,16)	30

Tabell 4. Dimensioner hos cylindrar enligt STANAG 2920. Hårdhet HRC 30. För toleranser se STANAG 2920. Längden justeras för att nå angiven massa.

Massa / g	Diameter / mm	Längd / mm
4,15±0,03	8,74±0,03	(8,82)
2,83±0,03	7,49±0,04	(8,19)
1,10±0,03	5,39±0,06	(6,17)
0,49±0,03	4,06±0,14	(4,78)
0,33±0,03	3,60±0,19	(4,07)
0,24±0,03	3,25±0,22	(3,64)
0,16±0,03	2,64±0,27	(3,77)

Tabell 5. Dimensioner hos sfärer enligt STANAG 2920. Hårdhet HRC 30. För toleranser se STANAG 2920.

Massa / g	Diameter / mm
4,11±0,03	10,0±0,03
2,99±0,03	9,0±0,03
1,13±0,03	6,5±0,06
0,51±0,03	5,0±0,10
0,37±0,03	4,5±0,12
0,26±0,03	4,0±0,15
0,18±0,03	3,5±0,19

Tabell 6. Dimensioner hos kuber enligt STANAG 2920. Hårdhet HRC 30. För toleranser se STANAG 2920.

Massa / g	Kantlängd / mm
4,15	8,09
2,83	7,12
1,10	5,20
0,49	3,96
0,33	3,46
0,24	3,12
0,16	2,74

Tabell 7. Dimensioner hos parallelepipedrar enligt STANAG 2920. Hårdhet HRC 30. För toleranser se STANAG 2920. Längden justeras för att nå angiven massa.

Massa / g	Tvårsnitt / mm ²	Längd / mm
2,85	5,8x5,8	(11,6)
1,10	4,0x4,0	(8,9)
0,20	2,0x2,0	(6,7)

Cylindrarna enligt STANAG 2920 ska inte förväxlas med de cylindrar som används framförallt i amerikanska hjälm- och skyddsvästs-specifikationer. Dessa RCC⁴⁶:er är inte standardiserade men återfinns i specifikationer⁴⁷. För massa och dimensioner se tabell 8.

Tabell 8. RCC. Hårdhet HRC 29.

Massa / grains	Massa / g	Diameter / mm	Längd / mm
2	0,130	2,8194	(2,8194)
4	0,259	3,4036	(3,7338)
16	1,037	5,5626	(5,6134)
64	4,147	8,7376	(9,017)

⁴⁶ RCC – Right Circular Cylinder

⁴⁷ "Purchase Description (PD) for Enhanced Combat Helmet version 1.0", Marine Corps Systems Command, CECS, PM Infantry Combat Equipment, 2200 Lester Street, Quantico, VA, GL-PD-09-04, 2009

8.2 Förslag på framtida arbete

Rilbe⁴⁸ genomförde studier och tog fram parametrar till sin penetrationsmodell för ett antal olika projektiler och material, tabell 9.

Tabell 9. Projektil-skyddsmaterialkombinationer sammanställda av Rilbe⁴⁸.

Skyddsmaterial→ Projektil↓	Pansarstål KAF 415-8	Handelsstål SIS 1311	Dural
Kub av Dural			X
Kula av mjukt stål	X ⁴⁹	X ⁴⁹	
Kula av hårt stål	X ⁵⁰	X ⁵⁰	X
Kub av stål	X	X	X
Splitter av stål		X	X
Kula av hårdmetall	X		
Splitter av hårdmetall	X		
Stor kula av volfram	X ⁵¹	X	
Liten kula av volfram	X ⁵²		

Under 2011 kommer en studie av splittergeometrier att genomföras. Målet är att genom litteraturstudier och skjutförsök jämföra FSP och andra splittersimulatorer med naturligt formade splitter mot några relevanta skyddsmaterial. Studien kommer också att ge ett visst experimentellt underlag rörande luftbromsning av naturligt formade splitter – se kap. 6.

⁴⁸ Ulf Rilbe, "Splitters genomslagsförmåga. Sammanställning av numeriska värden grundade på försök och beräkningar", FOA, Stockholm, FOA A 2525 - 44, 1976.

⁴⁹ HRC 12

⁵⁰ HRC 63

⁵¹ Diameter 20 mm

⁵² Diameter ≤12 mm