

Lärobok i Militärteknik, vol. 4: Verkan och skydd



Lärobok i Militärteknik, vol. 4

Verkan och skydd

Kurt Andersson
Stefan Axberg
Per Eliasson
Staffan Harling
Lars Holmberg
Ewa Lidén
Michael Reberg
Stefan Silfverskiöld
Ulf Sundberg
Lars Tornérhielm
Bengt Vrethblad
Lars Westerling



Lärobok i Militärteknik, vol. 4: Verkan och skydd

Författare: Kurt Andersson, Stefan Axberg, Per Eliasson, Staffan Harling, Lars Holmberg, Ewa Lidén, Michael Reberg, Stefan Silfverskiöld, Ulf Sundberg, Lars Tornérhielm, Bengt Vretblad, Lars Westerling

Lärobok i Militärteknik nr. 5

© Försvarshögskolan och författarna 2009

Mångfaldigandet av innehållet i denna bok är enligt lagen om upphovsrätt förbjudet utan medgivande av Försvarshögskolan.

Bokens innehåll har granskats och godkänts av Militärvetenskapliga institutionens publikationsråd.

Serieredaktör: Stefan Axberg

Projektledare: Per Eliasson

Redaktör: Kurt Andersson

Grafisk form och teknisk redigering: Ulrika Sjöström

Tryck: Elanders, Vällingby 2009

Första upplagan, första tryckningen, februari 2009

ISSN 1654-4838

ISBN 978-91-89683-08-2

För mer information om Försvarshögskolans publikationer, kontakta oss på telefonnummer 08-553 42 500 eller besök vår hemsida www.fhs.se/publikationer.

Innehållsförteckning

| | |
|---|----|
| Förord | 11 |
| 1. Inledning | 13 |
| 1.1 Historik | 13 |
| 1.2 Centrala begrepp | 14 |
| 1.2.1 Stridsdelar | 14 |
| 1.2.2 Skydd | 15 |
| 2. Explosivämnen | 17 |
| 2.1 Vad är ett explosivämne? | 17 |
| 2.2 Något om explosivämnets kemi | 19 |
| 2.3 Sprängämnen och deras militära nytta | 21 |
| 2.4 Drivämnen och deras militära nytta | 22 |
| 2.5 Tändämnen och deras militära nytta | 24 |
| 2.6 Pyrotekniska satser och dess militära nytta | 24 |
| 2.7 Utveckling | 25 |
| 3. Penetrerande stridsdelar och deras verkansformer | 27 |
| 3.1 Projektiler | 27 |
| 3.1.1 Finkalibriga projektiler | 28 |
| 3.1.2 Mellankalibriga projektiler | 32 |
| 3.1.3 Grovkalibriga projektiler | 34 |
| 3.2 Splitterstridsdelar | 38 |
| 3.2.1 Splitterstridsdelars fragmentering | 39 |
| 3.2.2 Splittrens hastighet och riktning | 43 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.2.3 | Splitters penetrationsegenskaper | 46 |
| 3.3 | RSV-stridsdelar | 47 |
| 3.3.1 | Strålbildande RSV-stridsdelar | 48 |
| 3.3.2 | Projektilbildande RSV-stridsdelar | 57 |
| 3.3.3 | Tandemstridsdelar | 59 |
| 3.3.4 | Övriga RSV-stridsdelar | 60 |
| 4. | Övriga konventionella stridsdelar och deras verkansformer | 61 |
| 4.1 | Tryckverkande stridsdelar | 61 |
| 4.1.1 | Tryckverkan | 62 |
| 4.1.2 | TNT-ekvivalent | 64 |
| 4.1.3 | Tryck från vapen | 64 |
| 4.1.4 | Skallagar | 65 |
| 4.1.5 | Inneslutna laddningar | 67 |
| 4.1.6 | Inläckning | 68 |
| 4.1.7 | Termobariska laddningar och FAE | 68 |
| 4.1.8 | Verkan av luftstöt vågor | 69 |
| 4.1.9 | Människans tålighet mot luftstöt vågor | 70 |
| 4.1.10 | Skydd mot luftstöt vågor | 71 |
| 4.1.11 | Sprängverkan och markstöt vågsverkan | 72 |
| 4.1.12 | Verkan av vattenstöt våg/undervattensdetonation | 72 |
| 4.2 | Brandverkande stridsdelar | 73 |
| 4.3 | Kombinationsstridsdelar | 74 |
| 4.3.1 | Tandemstridsdelar | 74 |
| 4.3.2 | Flerfunktionsstridsdelar | 74 |
| 4.4 | Adaptiva stridsdelar | 75 |
| 4.5 | Improviserade stridsdelar | 75 |
| 5. | Ballistiskt skydd mot konventionella verkansformer | 77 |
| 5.1 | Ballistiska skydd mot penetrerande stridsdelar | 77 |
| 5.1.1 | Homogena skyddsmaterial – metaller | 78 |
| 5.1.2 | Homogena skyddsmaterial – fiberbaserade material | 80 |
| 5.1.3 | Homogena skyddsmaterial – keramer | 83 |
| 5.1.4 | Homogena skyddsmaterial – övriga material | 87 |
| 5.1.5 | Homogena skyddsmaterial – skyddsmekanismer i homogena material | 89 |
| 5.1.6 | Statiska geometriska skydd | 97 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1.7 | Dynamiska geometriska skydd | 100 |
| 5.1.8 | Elektriskt pansar | 104 |
| 5.2 | Skydd mot tryckverkande stridsdelar | 106 |
| 6. | Elektromagnetiska stridsdelar och skydd mot dessa | 107 |
| 6.1 | Elektromagnetiska hot | 107 |
| 6.1.1 | Störningar genererade av människan | 111 |
| 6.1.2 | Naturliga störningar | 112 |
| 6.2 | Högeffekt pulshade mikrovågsvapen (HPM) | 114 |
| 6.2.1 | HPM-hot, nulägesbeskrivning och närmaste framtid | 114 |
| 6.2.2 | HPM-källor | 116 |
| 6.2.3 | HPM-vapen | 118 |
| 6.2.4 | Koppling av HPM-strålning och dess verkan på system | 120 |
| 6.2.5 | Verkansavstånd för HPM | 122 |
| 6.2.6 | HPM-skydd | 123 |
| 6.2.7 | Användningsområden för HPM-vapen | 125 |
| 6.2.8 | Rättsläge avseende HPM-vapen | 130 |
| 6.3 | Laser | 130 |
| 6.3.1 | Allmänt om laser som vapen | 130 |
| 6.3.2 | Strukturförstörande laser | 130 |
| 6.3.3 | Prognos för laservapen mot 2015-2020 | 132 |
| 6.3.4 | Sammanfattning laservapen | 133 |
| 7. | Nukleära stridsdelar (N- o R-stridsdelar) | 135 |
| 7.1 | Radioaktivitet och joniserande strålning | 136 |
| 7.2 | Radiologiska (R-) stridsmedel | 139 |
| 7.3 | Nukleära (N-) stridsmedel – kärnladdningar | 139 |
| 7.3.1 | Fissionsladdningar – ”atombomber” | 139 |
| 7.3.2 | Fusionsladdningar – ”vätebomber” | 141 |
| 7.3.3 | Fissionsladdningar med fusionsbidrag – ”boosting” | 142 |
| 7.3.4 | Verkansformer | 142 |
| 7.3.5 | Avstånd för direktverkan vid kärnladdningsexplosioner | 143 |
| 7.3.6 | Neutronbomben | 144 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8. | Biologiska och kemiska stridsmedel | 145 |
| 8.1 | Vad är kemiska stridsmedel, C-stridsmedel? | 146 |
| 8.1.1 | Nervgaser | 148 |
| 8.1.2 | Senapsgaser | 148 |
| 8.1.3 | Arsiner | 150 |
| 8.1.4 | Cyanväte | 150 |
| 8.1.5 | Tårgas | 151 |
| 8.1.6 | Pepparspray | 152 |
| 8.1.7 | Psykokemiska stridsmedel | 152 |
| 8.1.8 | Toxiner | 153 |
| 8.2 | Utspridning av C-stridsmedel | 155 |
| 8.3 | Skydd mot C-stridsmedel | 157 |
| 8.3.1 | Fysiskt skydd | 158 |
| 8.3.2 | Personligt skydd | 158 |
| 8.3.3 | Kollektivt skydd | 161 |
| 8.3.4 | Kollektivt skydd i fordon | 162 |
| 8.3.5 | Medicinskt skydd | 163 |
| 9. | Graderad verkan och ”icke dödande vapen” | 165 |
| 9.1 | Graderad vapeninsats | 166 |
| 9.2 | Målbestämning | 167 |
| 9.3 | Allmänt om ”icke dödande vapen” | 167 |
| 9.4 | Upploppsbekämpning | 169 |
| 9.5 | Operationella synpunkter | 170 |
| 9.6 | Legalitet m.m. | 171 |
| 9.7 | Fysisk och psykisk verkan | 172 |
| 9.7.1 | Dos- Effekt | 173 |
| 9.8 | Teknik för reglerbar, icke dödande verkan | 174 |
| 9.8.1 | Icke-penetrerande projektiler – ”Gummikulor” | 175 |
| 9.8.2 | Nätteknologier | 178 |
| 9.8.3 | Elektriska (elektriska stötar) | 178 |
| 9.8.4 | Kemiska (tårgas, klister, ”superhala” ämnen, korrosionsaccelererande etc.) | 179 |
| 9.8.5 | Farmakologiska och biologiska (lugnande, irriterande, illaluktande etc.) | 179 |
| 9.8.6 | Optiska (laser, blixtar och, visuell stimuli) | 180 |
| 9.8.7 | Mikrovåg (HPM, EMP) | 181 |
| 9.8.8 | Akustiska (infraljud, hörbart, ultraljud) | 181 |

| | |
|--|-----|
| 10. Eldrörsteknik | 183 |
| 10.1 Ammunition | 184 |
| 10.2 Tändrör | 184 |
| 10.3 Om olika typer av eldrörssystem | 185 |
| 10.4 Innerballistik, förloppet i eldröret | 188 |
| 10.5 Ytterballistik, förloppet i luften | 189 |
| 10.6 Faktorer som påverkar ett eldrörssystemets verkan. | 193 |
| 10.7 Metoder att öka verkan hos eldrörsvapen | 195 |
| 10.8 Övriga metoder | 197 |
| 10.8.1 Sikten/centralinstrument | 197 |
| 10.8.2 Bankorrigerig, målsökning, styrning | 197 |
| 10.8.3 MRSI | 198 |
| 10.9 Eldrörsvapen mot oskyddade och lätt skyddade markmål | 198 |
| 10.10 Eldrörsvapen mot pansrade markfordon | 204 |
| 10.11 Eldrörsvapen mot ytfartyg | 207 |
| 10.12 Eldrörsvapen mot luftmål | 207 |
| 11. Missilteknik | 211 |
| 11.1 Missiler | 212 |
| 11.2 Missilsystem | 215 |
| 11.2.1 Kollimationsstyrning eller siktlinjestyrning | 224 |
| 11.2.2 Målsökarstyrning | 224 |
| 11.3 Användningsområden | 226 |
| 12. Torpedteknik | 229 |
| 12.1 Torpedens verkan | 232 |
| 12.2 Torpedens framdrivning | 234 |
| 12.3 Torpedens styrning | 237 |
| 12.4 Användningsområden | 240 |
| 13. Övrig leveransteknik | 243 |
| 13.1 Flygbomber | 243 |
| 13.2 Minor | 244 |
| 13.3 Sjunkbomber och anti-ubåtsgranater | 247 |
| 13.4 Vapen för strid i bebyggelse | 247 |

| | |
|---|-----|
| 14. Skydd av typmål | 249 |
| 14.1 Trupp | 249 |
| 14.2 Transportfordon | 250 |
| 14.3 Lätta stridsfordon | 250 |
| 14.4 Stridsvagnar | 252 |
| 14.5 Flygplan och helikoptrar | 253 |
| 14.6 Fartyg | 253 |
| 14.7 Ubåtar | 254 |
| | |
| 15. Verkansvärdering | 255 |
| 15.1 Simuleringsmodeller | 256 |
| 15.2 Verkan i markmål | 257 |
| 15.3 Verkan i luftmål | 258 |
| 15.4 Verkan i sjömål | 260 |
| 15.5 Verkan i bebyggelse | 262 |
| | |
| Bilaga 1. Dimensionsanalys och skalning | 263 |
| | |
| Bilaga 2. Kontinuummekaniska simuleringar | 275 |
| | |
| Källförteckning | 285 |
| Tryckta källor | 285 |
| Källor på internet | 289 |
| Referenser till Bilaga A och B | 289 |
| | |
| Om bokens författare | 291 |
| | |
| Serien ”Lärobok i Militärteknik” | 293 |

Förord

Vi lever i en föränderlig värld där även krigets karaktär förändras; dess konsekvenser är dock lika ohyggliga som tidigare. Hoten är nya och ofta dolda. Traditionella fronter försvinner, nationalstater är sedan länge inte de enda parterna vid konflikter. Kunskap om och förståelse av de militära arbetsredskapens funktion och nyttjande utgör en viktig framgångsfaktor för dagens och morgondagens officer. Verktygen är till helt övervägande del av teknisk art. Denna nära koppling mellan teknik, taktik och operationer behöver betonas inom officersutbildningen. Detta sker genom ämnet militärteknik. Militärteknik är nämligen den vetenskap som beskriver och förklarar hur tekniken inverkar på militär verksamhet på alla nivåer och hur officersprofessionen påverkar och påverkas av tekniken. Militärtekniken har sin grund i flera olika ämnen från skilda discipliner och förenar samhällsvetenskapens förståelse av den militära professionen med naturvetenskapens fundament och ingenjörsvetenskapens påbyggnad och dynamik. Militärtekniken behandlar således tekniken i dess militära kontext och utifrån officerens perspektiv.

Som följd av militärteknikens tvärvetenskaplighet studeras och utvecklas ämnet med stöd av både natur-, samhälls-, och ingenjörsvetenskaper. De metoder vilka traditionellt tillämpats är främst kvantitativa. Matematik, statistik, tekniska experiment, modellering och simulering är exempel på sådana metoder. Vid studiet av interaktionen mellan teknik och taktik, operation respektive strategi kan även kvalitativa metoder behövas.

Teknikens påverkan finns på såväl stridsteknisk, taktisk/operativ som strategisk nivå. Påverkan är mest tydlig och mätbar på lägre nivåer, t.ex. när ett eller flera tekniska system av motståndaren sätts ur spel genom störning, vilseledande information etc. och man genom att använda sig av en kombination av teknisk och taktisk kompetens genomför erforderlig taktikanpassning. Med

god kunskap om verktygen, dvs. allt från vapen och plattformar till informations- och ledningssystem samt principer för att bedriva strid på olika nivåer kan den väpnade striden föras framgångsrikt på alla nivåer. Teknikens påverkan ökar dock på strategisk nivå och är då ofta knuten till väsentliga teknologiska utvecklingssteg.

Föreliggande Lärobok i Militärteknik, LIM, är uppdelad i flera delar, av vilka detta är den fjärde. Skilda teknikområden, fundamentala för FM förmågor, redovisas i separata bokvolymerna för att vid behov snabbt kunna revideras utan att hela boken för den delen måste omarbetas. Likaså möjliggör denna struktur att nya och för officersprofessionen viktiga teknikområden snabbt och enkelt kan ingå i läroboken genom att addera nya volymer.

Denna volym, benämnd Verkan och Skydd, beskriver utifrån ett verkans- och skyddsperspektiv olika principiella typer av vapensystem. Fokus är lagt på stridsdelarna, deras leveranssätt och skydd mot desamma. Volymen skall ses som stöd för inledande militärtekniska studier. Inledningsvis beskrivs explosivämnen och skilda typer av stridsdelar, varefter eldrörsteknik, följt av misilteknik och torpedteknik behandlas. Volymen avslutas med ett avsnitt om skyddsteknik. Som bilaga är fogat en kortfattad beskrivning över dimensionsanalys och skallagar samt ett avsnitt där kontinuummekaniska simuleringar beskrivs och exemplifieras. Bilagorna finns medtagna för att öka förståelsen för resultat erhållna vid modellförsök med stridladdningar och projektiler – ofta är fullskalförsök ej möjliga att genomföra. Man bör dock beakta att denna volym i dess första utgåva saknar beskrivning av flera för vapensystemen väsentliga delsystem och delkomponenter såsom test- och underhållssystem – en brist som avses rättas till vid nästa utgåva

Studiet av teknik för militära syften ger nödvändig teknisk förståelse liksom kunskaper inom relevanta och aktuella teknikområden. Detta skapar förutsättningar för att förstå interaktionen mellan teknik och militär verksamhet. Militärtekniken utgör nämligen länken mellan den rena teknikkunskapen och dess tillämpningar inom officersprofessionen och jag hoppas att Lärobok i Militärteknik kommer att tillföra dagens och morgondagens officerare kunskaper och intellektuella redskap till fromma för såväl karriär som försvarsmakt

Stockholm i oktober 2008

Stefan Axberg

Professor i Militärteknik

Huvudredaktör för LIM

1. Inledning

1.1 Historik

Historiken för konventionella stridsdelar och vapensystem brukar delas in i 3 olika perioder: tiden före svartkrutet (fram till 1300 i Europa), svartkrutsepo-ken eller ”den lågexplosiva epoken” (1300 - ca 1850) och den ”moderna” tiden ibland kallad den ”högexplosiva epoken” från det att bomullskrutet och nitro-glycerinet uppfanns 1846.

De tidigaste avståndsverkande stridsdelarna var stenar och spjut som kasta-des iväg med handen mot motståndaren.

Genom att införa vapen som slungor och pilbågar kunde man öka räckvidd och verkan av dessa stridsdelar avsevärt. De första varianterna var enmansvapen där man använde muskelkraften direkt som senare utvecklades till anordningar där man kunde ladda vapnen med manuell energi via olika mekaniska anord-ningar. Exempel på sådana vapen är dels enmansvapnet armborst, dels stora slungmaskiner (belägringsmaskiner) som betjänades av ett stort antal soldater.

I och med att svartkrutet uppfanns (i början av 1300-talet i Europa, långt tidigare i Kina) började även vapen som använde kemisk energi att tas fram. I Europa användes i första hand slätborrade eldrörsvapen som sköt iväg kulor av sten eller metall eller pilformade projektiler. Även svartkrutladdade granater och brandstridsdelar i form av upphettade projektiler användes. Under 1800-talet infördes räfflade eldrör vilket gjorde det möjligt att utveckla rotationsstabi-liserade stridsdelar med litet luftmotstånd och stor verkan i målet.

Uppfinnandet av nitroglycerin och nitrocellulosa (bomullskrut) gjorde att väsentligt bättre prestanda erhöles för både vapen och stridsdelar. De kunde användas både som krut och som sprängämne. Krut av denna typ används fortfarande i stor utsträckning. På sprängämnessidan kom ett stort genombrott

i början av 1900-talet genom införande av TNT (trotyl). Detta var det dominerande sprängämnet under första och andra världskriget och förekommer fortfarande i stor utsträckning.

Från andra världskriget och framåt har ett antal nya kruttyper och sprängämnen tillkommit. Nya måltyper och väsentligt förbättrade skyddsmetoder har drivit fram ett stort antal olika stridsdelstyper med allt bättre verkan. En annan starkt drivande parameter för modern ammunition är önskan att göra den så okänslig för fientlig verkan som möjligt (engelskans ”IM – Insensitive Munition”).

1.2 Centrala begrepp

1.2.1 Stridsdelar¹

Stridsdelen är den del i ett vapensystem som ger verkanseffekterna i målet. Förutom stridsdelen består ett vapensystem av det som tekniskt krävs för att stridsdelen ska kunna ge avsedd verkan/effekt i målet, t.ex. utskjutningsanordning, målsökare, utlösninganordning.

Stridsdelar indelas traditionellt efter sin verkansform i stridsdelar som utnyttjar penetration, tryck eller brand (s.k. konventionella stridsdelar), samt nukleära (N), biologiska (B), kemiska (C) och radiologiska (R) stridsdelar. De fyra senare (NBCR-stridsdelar) betecknas som massförstörelsevapen (engelskans ”WMD – Weapons of Mass Destruction”) då de ger stor och bitvis okontrollerad verkan. På senare tid har även andra typer av stridsdelar tillkommit som t.ex. sådana som bygger på elektromagnetisk strålning (HPM och laser) och ”icke-dödande” vapen.

Denna bok behandlar huvudsakligen konventionella stridsdelar och deras verkan. Stridsdelar som skjuts ur någon form av eldrör kan antingen vara granater, som är sprängämnesfyllda eller projektiler som är inerta, d.v.s. inte innehåller någon form av sprängmedel. En artillerigranat är fylld med sprängmedel medan en pilprojektil till en stridsvagn består av ett inert material såsom ”tungmetall” (volframkomposit). Nedan ges även en kort översikt av övriga stridsdelstyper.

Begreppet *verkan* används med något olika innebörd på de olika systemnivåerna. Då växelverkan mellan enskilda stridsdelar och skyddskomponenter studeras används begreppet verkan för att beskriva det fysikaliska växelverkansförloppet liksom de fysikaliska effekter som uppstår vid penetration (restverkan).

1. Se även t.ex. FortH 1, 1991, M7747-707112 och AmläraA, M7730-850020.

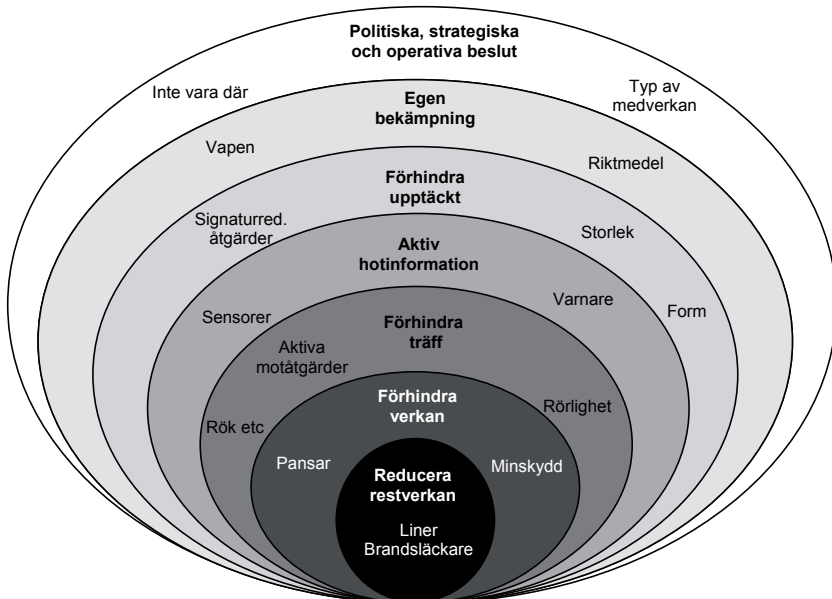
Om vapensystems verkan mot olika mål, resp. måls sårbarhet för vissa hot, studeras används verkansbegreppet för att bedöma den uppnådda effekten. På denna nivå kommer, utöver den enskilda stridsdelens verkan, även faktorer som träffsannolikhet, målets uppbyggnad och sårbarhet och vilka vitala komponenter som påverkas osv., att få betydelse.

I det första fallet beskrivs verkan i form av verkansmekanismer, i det andra fallet i form av utslagningssannolikheter.

Värderingar på ändå högre systemnivå, såsom värdering av förbands stridseffektivitet i en viss stridssituation, inbegriper taktiska, strategiska och politiska överväganden. Dessa värderingar kräver tillgång till kunskap om verkan av enskilda vapensystem i olika måltyper, som i sin tur bygger på kännedom om enskilda stridsdelars verkan i mål- och skyddskomponenter.

1.2.2 Skydd

Skydd i vid bemärkelse innefattar alla åtgärder som man vidtar för att minimera fiendlig verkan. Här ingår taktiskt uppträdande, möjligheten att slå ut fienden innan fienden slår ut dig, rörlighet, maskering, aktiv och passiv signaturreduktion, ballistiskt skydd, redundanta system och reduktion av restverkan. Detta sammanfattas ofta i begreppet överlevnad och illustreras med den så kallade skyddslöken som visas i *Figur 1.1*.



Figur 1.1. Skyddslöken. (Källa: FOI)

Med ballistiskt skydd avses, traditionellt, pansar som mekaniskt stoppar inkommande stridsdelar. Detta begrepp har nu utvidgats till att även innefatta mer komplicerade konstruktioner och aktiva åtgärder som reducerar verkan av hotstridsdelarna. Det ballistiska skyddet är ofta uppbyggt av flera delkomponenter som tillsammans kan stoppa det inkommande hotet.

Ballistiska skydd används för såväl fasta, fortifikatoriska anläggningar som rörliga objekt. De fortifikatoriska anläggningarna ska ofta skyddas mot extremt kraftiga hot som kärnvapen och andra stora stridsdelar. I denna bok koncentrerar vi oss på ballistiska skydd för rörliga objekt såsom enskild soldat, transportfordon, stridsfordon, flygfarkoster, fartyg och ubåtar. I dessa fall ska skyddet förutom att förhindra penetration också ha så låg vikt och liten volym som möjligt.

De material- och konstruktionslösningar som väljs för skydd av olika objekt beror i hög grad på de hot skyddsobjektet måste kunna klara. Moderna ballistiska skydd består ofta av ett grundskydd som är integrerat i den bärande strukturen, och tilläggskydd mot svårare hot. Grundskyddet skall klara mängdhot för den taktiska situation som skyddsobjektet är avsett. Tilläggskyddet kan vara delvis utbytbart för att möjliggöra anpassning till aktuell hotbild.

2. Explosivämnen

Explosivämnen är av allra största vikt för alla tillämpningar i denna bok, varför vi inleder med en kort presentation av detta ämnesområde².

2.1 Vad är ett explosivämne?

Vad karakteriserar egentligen ett explosivämne? Utgår man från definitionen i lagtexten så säger den följande: ”Fasta eller flytande ämnen som kan bringas till en snabb kemisk reaktion, varvid energi frigörs i form av tryck-volymsarbete och/eller värme”. Den snabba kemiska reaktionen kallas i vardagligt tal explosion³. Den energi som avges från ett explosivämne ligger vanligtvis i intervallet 1-20 MJ/kg. Om man betraktar reaktionsförloppet så kan man säga att om explosivämnet bildar gaser som reaktionsprodukter avges energin till stora delar som tryck-volymsarbete. I de fall explosivämnet bildar fasta eller flytande reaktionsprodukter avges energin huvudsakligen som värme.

Explosivämnena frigör sin energi genom deflagration eller detonation. Med deflagration avses att explosivämnet förbränns med en viss förbränningshastighet (dm/s, en hastighet som är lägre än ljudhastigheten i ämnet, underljudhastighet) men hastigheten beror i hög grad på omgivande tryck och temperatur. Explosivämnen som deflagrerar eller brinner används framförallt för militära ändamål till utskjutning och framdrivning av projektiler och raketer (t.ex. krut).

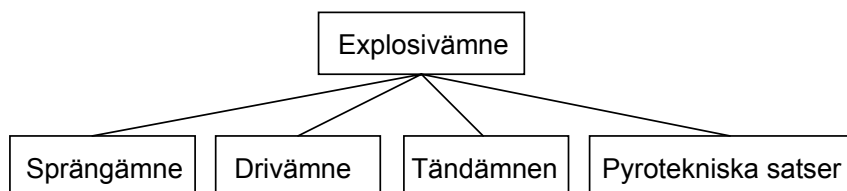
2. Se även t.ex. A Baily & S G Murray, *Explosives, propellants & Pyrotechnics*. Brassey's (UK), London 1989.

3. Explosion är dock ett mycket större begrepp enl. Nationalencyklopedin ” explosion = plötslig expansion av materia till en mycket större volym än den ursprungliga. Exempel på explosioner är expansion av en komprimerad gas när dess behållare brister, förbränning av en luftbränsleblandning i en förbränningsmotor, förbränning av krut i en kanon vid utskjutningen av en projektil, detonation av ett sprängämne”.

Om vi då betraktar detonationen i stället så avses med detonation att reaktionen i explosivämnet går fram med en viss detonationshastighet (km/s, en hastighet som är högre än ljudhastigheten i ämnet, överljudhastighet). Den höga detonationshastigheten innebär att detonationen sker i det närmaste samtidigt i hela explosivämnet varvid explosivämnet under mycket kort tid kan omvandlas till gas. Den utvecklade gasmassan har ett högt tryck (10 000 MPa) och en hög temperatur (2 500–4 500° C) och ger upphov till en stötvåg. Explosivämnen som detonerar används för militära ändamål bland annat till sprängämnen i granater (t.ex. trotyl) men också för antändning av andra explosivämnen.

Gemensamt för alla explosivämnen är att de måste tillföras energi för att den energi som finns kemiskt lagrad i explosivämnet kan frigöras. Den tillförda energin kallas i vardagligt tal för *aktiveringsenergi* eller *initieringsenergi*.

Med anledning av olika funktion och användningsområde indelas explosivämnen traditionellt i fyra grupper enligt följande figur.



Figur 2.1. Indelning av explosivämnen. (Källa: FOI)

Det är en viss skillnad mellan funktion och användningsområde mellan de olika typerna av explosivämne och hur detta visar sig framgår av följande tabell.

Tabell 2.1. Olika explosivämnenas funktion och arbetsområde

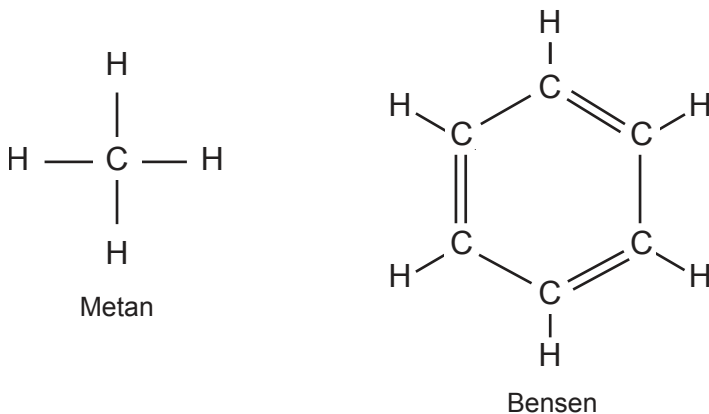
| Typ | Funktion/reaktion | Aktiveringsenergi | Användningsområde |
|------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Sprängämne | Detonation | Hög | Åstadkomma sprängverkan |
| Tändämne | Deflagration | Måttlig | Initiera sprängämnen |
| Drivämne | Detonation eller deflagration | Låg | Framdrivning av projektiler |
| Pyroteknisk sats | Deflagration | Varierande | Åstadkomma rök, ljus m.m. |

Den gängse benämningen i bestämmelser för explosivämnen eller produkter som innehåller explosivämnen är explosiva varor. Explosiva varor innehåller ofta flera av de olika explosivämnena. Särskild lagstiftning reglerar hantering, vilket innebär bl.a. innehav, tillverkning, förvaring och transport, av explosivämnen.

2.2 Något om explosivämnets kemi

Det finns många olika typer av explosivämnen men en gemensam egenskap för alla är att de är någon form av ett oxidator – bränslesystem. Med detta avses att explosivämnet antingen kan innehålla både bränsle och oxidator i en enda molekyl – ett enkomponentsystem (t.ex. troyl) eller utgöras av en blandning av olika ämnen (t.ex. svartkrut). I det närmaste alla praktiskt användbara explosivämnen är uppbyggda av grundämnena kol, kväve, syre och väte. Metaller förekommer också t.ex. i tändämnet silverazid (AgN_3) eller för att höja energiinnehållet i sprängämnen och (raket)drivämnen.

Huvuddelen av alla explosivämnen är organiska föreningar. Med detta avses att de är uppbyggda i en struktur i form av ett skelett av kolatomer. Dessa strukturer indelas i två huvudgrupper som benämns *aromater* eller *alifater* och det är dessa unika strukturer som skiljer de olika organiska föreningarna åt. Ett exempel på en alifat är den kemiska föreningen metan CH_4 medan ett exempel på en aromat kan utgöras av den kemiska föreningen bensen C_6H_6 . Se *Figur 2.2*.



Figur 2.2. De kemiska föreningarna metan CH_4 och bensen C_6H_6 . (Källa: FOI)

Vad karakteriserar då en kemisk reaktion? En kemisk reaktion kan beskrivas som en omvandling av två eller flera ämnen, s.k. reaktanter, till ett eller flera andra ämnen, s.k. produkter. Det som skiljer dessa åt är den inre lagrade energin. Med inre energi skall förstås den energi som finns lagrad i bindningarna mellan atomerna i varje molekyl i den kemiska föreningen.

Om reaktanterna innehåller mer energi än produkterna kan energi frigöras som värme under reaktionen. Detta innebär att reaktionen är *exoterm* d.v.s. att värme frigörs. Om fallet är att produkterna innehåller mer energi än reaktanterna så måste energi tillföras för att reaktionen skall ske och det kallas då för en *endoterm* reaktion.

Enkelt kan det åskådliggöras på följande sätt:

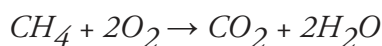


I exoterma reaktioner behövs trots allt en viss energi för att reaktionen skall komma till stånd och den energin kallas som sagts aktiveringsenergi eller initieringsenergi. Värt att påpeka är att aktiveringsenergin är väsentligt lägre än den energi som frigörs vid en exoterm reaktion. I detta sammanhang kan det nämnas att vissa ämnen har en förmåga att öka reaktionshastigheten av kemiska reaktioner. Ämnen med en sådan förmåga kallas katalysatorer.

De kemiska reaktioner som sker som deflagration eller detonation är exoterma och kan delas in i tre huvudtyper:

- a) Bränsle + Oxidator \rightarrow Produkter + Energi
- b) Enkomponentsystem \rightarrow Produkter + Energi
- c) Kemisk förening \rightarrow Grundämnen + Energi

Ett exempel på en kemisk reaktion enligt typ a) kan följande utgöra:

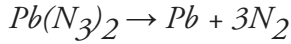


Den kemiska reaktionen ovan utgörs av gasen metan som oxideras till koldioxid och vatten. För att förbränningen skall ske med hög hastighet krävs att ämnena är ordentligt blandade.

Om man då skall exemplifiera en kemisk reaktion enligt typ b) så kan den utgöras av följande:



Enkomponentsystemet nitroglykol som sönderfaller till koldioxid, vatten och kvävgas. Oxidatorn och bränslet finns här i samma molekyl som synes. Ett exempel på en kemisk reaktion typ c) kan vara sönderfallet av tändämnet blyazid:



Blyazid som under energiutveckling sönderfaller till fast bly och kvävgas.

Vad är det då som får ett explosivämne att deflagrera eller detonera?

Alla explosivämnen innehåller kemisk lagrad energi i mindre eller större mängd som kan frigöras antingen genom sönderfall eller genom en kemisk reaktion. Kriterierna för att explosiva förlopp skall starta är att tillförd energi samt producerad energi är större än energiförlusterna till omgivningen.

Om man vill initiera ett explosivämne till deflagration krävs normalt energier på 0,1-100 J/cm² och effekter per ytenhet på 0,1-100 W/cm². Detta kan åstadkommas genom slag, friktion, värmekällor eller elektriska urladdningar.

Om man istället vill initiera ett explosivämne till detonation krävs energier på 0,001-10 kJ/cm² och effekter per ytenhet på 1-10 GW/cm². Den lägre siffran i båda fallen avser tändämnen medan den högre avser sprängämnen. De högre nivåerna av energi- och effekttäthet åstadkommes i huvudsak genom stötvågor. En stötvåg kan genereras av ett detonerande explosivämne (tändämne).

2.3 Sprängämnen och deras militära nytta

Sprängämnen utgörs i huvudsak av fasta ämnen och förekommer som antingen fria laddningar eller som ”motor” i en stridsdel. Gemensamt för sprängämnen är att de sönderfaller under detonation där reaktionsprodukterna till huvuddel är gaser. Verkan av ett sprängmedel är beroende av en rad faktorer. De faktorer som har störst betydelse är sprängämnets energiinnehåll och detonationshastighet men även geometrisk form och möjligheter till fördämning har betydelse. Ett högt energiinnehåll ger sprängämnet en god arbetsförmåga. En god arbetsförmåga ger bl.a. splittren i en spränggranat (stridsdel) hög hastighet vilket i sin tur ökar verkan för den enskilda granaten. En hög detonationshastighet ger en kraftig stötvåg vilket innebär, om man exemplifierar med spränggranaten igen, att höljet på granaten i fråga ger uppkomst till splitter. Förenklat kan sägas att ju högre detonationshastighet för sprängämnet desto fler splitter givet samma konstruktion för spränggranaten. Viktigt att påpeka här är att man inte alltid vill ha ett stort antal splitter då alltför många splitter ger en liten massa per splitter vilket inte ger optimal verkan för granaten i fråga.

Då gaserna av det detonerade sprängämnet expanderar vinkelrätt mot sprängämnets yta innebär detta att en fördämning av sprängämnet gör att sprängverkan kan riktas och därigenom öka sprängämnets effekt. En liknande effekt har sprängämnets geometriska form vilket kan höja effekten avsevärt (RSV). Detta kan ha stor betydelse i samband med fältarbeten där tillgången på sprängmedel kan vara begränsade.

Vilka typer av sprängämnen förekommer då för militära ändamål?

Det vanligaste är fortfarande trotyl, TNT. I ren form kan det liknas vid gult stearin. Trotyl är stabilt och har en god lagringsbeständighet. Dessutom är det okänsligt för fukt vilket är en stor fördel. Trotyl har en relativt låg detonationshastighet (6800 m/s) vilket begränsar effekten en aning. Trotyl används i spränggranater och i stridsvagnsminor av äldre typ. Trotyl kan smältas varför det vanligaste sättet att tillverka laddningar av trotyl är att gjuta dessa t.ex. genom att fylla ett granatskal med smält trotyl som får stelna.

Pentyl är ett annat sprängämne som har högre detonationshastighet (8000 m/s) och energiinnehåll än trotyl vilket gör pentylen effektivare som sprängämne. Pentylen har den nackdelen att det är stötkänsligt. Pentyl består av färglösa kristaller och används i ren form i stubintråd.

Sprängdeg, som är en blandning av 85 % pentyl och 15 % mineralolja, är ett formlöst gulbrunt sprängämne där man tillvaratagit pentylens goda egenskaper men samtidigt gjort sprängdegen okänslig för fukt och stötar. Sprängdeg förekommer som fria ”patroner” och i slangladdningar ämnade främst för fältarbeten.

Sprängämnet hexogen, RDX, har något lägre detonationshastighet och energiinnehåll än pentyl. Hexogen har den fördelen jämfört pentyl att det är mindre stötkänsligt. Hexogen består, liksom pentyl och oktogen (se nedan), av färglösa kristaller och kan inte smältas utan att det förstörs varför laddningar av ren hexogen måste pressas. Om man vill ha gjutbara laddningar av hexogen måste det blandas med ett bindemedel t.ex. smält trotyl eller en (härdbar) plast. Bindemedlet gör då, förutom att gjutning är möjlig, att laddningen ”flegmatiserar” (görs mindre känslig). Hexogen blandat med trotyl kallas hexotol, ofta benämnt Comp B i engelskspråkig litteratur och förekommer som sprängmedel i pansarspränggranater och spränggranater. Hexotol, HBX, är hexotol med tillsats av aluminium och används i undervattensstridsdelar. (Orddelen ”tol” antyder oftast att trotyl används som bindemedel medan del ”al” anger att aluminium ingår i ämnet. Då en plast utgör bindemedel brukar benämningen PBX, ”plastic bonded explosive” användas, explosivämnet behöver i dessa fall inte vara hexogen utan kan också vara något annat t.ex. oktogen, se nedan.

Oktogen, HMX, liknar hexogen men har något högre detonationshastighet och energiinnehåll. Oktogen är dock känsligare för stötar än hexogen och är dyrare. Oktogen blandas, i likhet med hexogen, med trotyl till oktol som används i pansarspränggranater som har höga prestandakrav.

2.4 Drivämnen och deras militära nytta

Drivämnen kan utgöras av fasta och flytande ämnen. Gemensamt för de båda är att de, vanligtvis, sönderfaller under deflagration och avger därigenom gaser

som kan användas för framdrivning av projektiler, raketer och robotar. Ett, i militära sammanhang, vanligt förekommande drivämne är krut. I vätskeform har flytande drivämnen för eldrörsutskjutning något oegentligt benämnts *vätskekrut eller flytande krut*.

Krut indelas bl.a. i ”kemiska krut” och ”mekaniska krut” eller ”homogena krut” resp. ”heterogena krut” vilket motsvarar sprängämnenas indelning i ”enkomponent-sysstem” och ”flerkomponentsystem”. Av bland annat historiskt skäl indelas krut också i grupperna eldrörskrut och raketkrut vilket i vissa sammanhang kan vara mer lämplig på grund av att de krav man ställer på eldrörskrut och raketkrut är mycket olika. I ett eldrör vill man erhålla höga tryck (flera hundra MPa) under kort tid (några ms) medan man för en raket vill erhålla ett någorlunda konstant tryck (totalt MPa) under en längre tid (sek-min). Sett ur kemisk synvinkel är dock vissa raket- och eldrörskrut samma sak.

Ett mått, som man kan ha i åtanke då man värderar ett eldrörskruts prestanda, är det specifika arbetsvärdet, force, som ofta anges i MJ/kg, vilket inte är samma sak som krutets energiinnehåll. Ett eldrörskrut med höga prestanda har ett högt specifikt arbetsvärde. Motsvarande för raketkrut är måttet specifik impuls som anges i Ns/kg. Ett raketkrut med höga prestanda har en hög specifik impuls.

Värt att nämna i detta sammanhang är även betydelsen av krutets geometriska form. Den gasmängd som produceras då krutet brinner är proportionell mot brinnhastigheten och den brinnande ytan. Den brinnande ytan är beroende av krutets form och porositet vilket gör att krutet kan se olika ut beroende på vilket sätt gasproduktionen önskas ske. Detta gör att benämningar som bladkrut, stavkrut och flerhålskrut förekommer i drivämnessammanhang.

Vilka olika sorters krut finns då att tillgå för militära ändamål?

Nitocellulosakrut, NC-krut, eller singelbaskrut är ett fast ämne som framställs genom att nitrocellulosa gelatineras med etanol och eter. En annan benämning på detta krut är bomullskrut. Singelbaskrutet är något fukt känsligt vilket kan nedsätta krutets prestanda. Singelbaskrut används i ammunitionen för eldhandvapen och artilleripjäser.

Nitroglycerinkrut, NCGL-krut, eller dubbelbaskrut är ett fast ämne som framställs genom att nitrocellulosa gelatineras med nitroglycerin (ett vätskeförmigt explosivämne)⁴. Dubbelbaskrutet är energirikare än singelbaskrutet och mindre känsligt för fukt. En nackdel med denna typ av krut är att förbränningstemperaturen är hög vilket bidrar till eldrörsförslitningen. Dubbelbaskrut används i ammunitionen för bland annat stridsvagnskanoner och luftvärnspjäser där höga utgångshastigheter är önskvärda.

4. Åren 1887 och 1888 patenterade Alfred ett röksvagt krut av synnerligen god kvalitet. Han hade löst problemet med de gamla kruten och han kunde nu lansera det röksvaga krutet som kallades ”Nobelkrut” eller Ballistit. Detta krut bestod ursprungligen av lika delar nitroglycerin och nitrocellulosa tillsatt med ungefär 10% kamfer. [Källa: www.vinterviken-nobel.se]

Nitroguanidinkrut eller trippelbaskrut är ett fast ämne som framställs genom att dubbelbaskrut blandas med nitroguanidin. Trippelbaskrut är inte fukt känsligt och inte lika energirikt som dubbelbaskrut men har de fördelarna att eldrörsförslitningen och mynningsflamma blir mindre än vid bruk av dubbelbaskrut. Trippelbaskrutet kommer främst till användning i ammunition för större kanoner och pjäser.

Alla ovan nämnda krut, som baseras på nitocellulos, benämns också rök-svaga krut (bl.a. p.g.a. att det ger avsevärt mycket mindre rök än svartkrutet vilket använts under kanske 1 000 år fram till NC-krutets introduktion i mitten av 1800-talet).

Dubbelbaskrut används både som kanonkrut och som raketkrut.

Kompositkrut är ett fast ämne som framställs genom att blanda ett syrerikt salt med ett bindemedel och ev. också ett "extra" bränsle som en metall. Det i dag vanligaste är att använda ammoniumperklorat, AP, som syreavgivare och en härdplast, polymer, som bindemedel och tillika bränsle samt ofta också, för att öka den specifika impulsen, aluminium. Kompositkrutet kan göras mycket energirikt och ges en hög specifik impuls (över 2 600 Ns/kg). En nackdel med kompositkrutet av ovan nämnt slag är att det avger en röjande rökstrimma, speciellt i fuktig luft, och alltid då det innehåller aluminium. Kompositkrut används i raketmotorer i t.ex. i jaktmissiler och startraketer (allt från Rb 15 till rymdfärjan)(jmf avsnitt 11.2).

2.5 Tändämnen och deras militära nytta

Tändämnen utgörs i huvudsak av fasta ämnen i form av tungmetallsalter. Tändämnen karaktäriseras av att de kan initieras med en låg energitillförsel och att de sönderfaller under detonation. Därigenom avges en stötvåg och en låga som kan användas för tändning eller initiering av sprängämnen.

Tändämnen kan vara mycket stötkänsliga och fukt känsliga vilket ställer särskilda krav på förvaring och hantering. Det vanligaste förekommande tändämnet är blyazid som bland annat förekommer i tändhattar. Andra tändämnen är silverazid som används i elektriska sprängkapslar samt tricinat som tillsammans med blyazid är känsligt för låga och därigenom lämpligt i sprängpatroner som initieras av krutstubin.

2.6 Pyrotekniska satser och dess militära nytta

Pyrotekniska satser används för militära ändamål för att generera framförallt rök eller ljus. Den militära nyttan med att generera rök är att minska sikten men även att åstadkomma röksignaler. Pyrotekniska satser för rök utgörs i huvudsak av zink blandat med något klorerat kolväte. Blandningar med aluminium i stäl-

let för zink förekommer också men har en avsevärt högre brinnhastighet. Rökens förmåga att nedsätta siktförhållandena beror på partiklarnas ljusspridande förmåga som i sin tur beror på antalet partiklar per volymenhet rök.

Pyrotekniska satser för ljus utgörs i huvudsak av magnesium eller aluminium blandat i huvudsak med nitrater och perklorater som syregivare. Lyssatser kan för militära ändamål användas på olika sätt antingen som en kortvarig fotoblixt eller som långvarigt ljus. Spårljus för en projektil i sin bana är ett annat exempel på användning.

2.7 Utveckling

Vad avser utvecklingen av sprängämnen kan man i generella termer säga att man strävar mot att ta fram sprängämnen med en högre detonationshastighet och med ett högre energiinnehåll givet samma volym och vikt. Denna utveckling kan ses i ljuset av sprängämnet som ”motor” i en stridsdel. Ett effektivare sprängämne kan innebära att en ökad nyttolast i stridsdelen kan åstadkommas eller att stridsdelen kan ges en mindre volym och/eller vikt. Vilka egenskaper som efterfrågas beror på syftet med stridsdelen och vilka prestanda i övrigt som är av betydelse för vapensystemet. Utöver detta bör nämnas att man försöker göra nya sprängämnen mindre känsliga och mer lagringsbeständiga för att öka hanterbarheten och säkerheten. Miljöaspekterna blir också successivt allt viktigare varför man strävar efter att få bort s.k. tungmetaller som bly ur t.ex. tändämnen.

Vad avser utvecklingen av drivämnen kan, i generella termer, sägas att man strävar mot att utveckla drivämnen med högre förmåga till gasproduktion och med ett högre energiinnehåll givet samma volym och vikt i syfte att öka effektiviteten hos drivämnet i fråga. Ett effektivare krut för t.ex. ett artillerisystem gör att man kan skjuta längre vilket är en egenskap som efterfrågas för sådana system. Utöver detta kan sägas, liknande vad som sades om sprängämnen, att man försöker göra nya drivämnen mindre känsliga för ofrivillig initiering och mer lagringsbeständiga för att öka hanterbarheten och säkerheten. Även här kommer miljöaspekter (och signatur) mer och mer i fokus. Så t.ex. strävar man efter kompositkrut som inte lämnar rökstrimmor (som i exemplet ovan innehåller saltsyra) efter sig genom att t.ex. använda ämnen som inte innehåller klor.

3. Penetrerande stridsdelar och deras verkansformer

Penetrerande stridsdelar verkar genom att tränga in i målet med hjälp av penetratorns rörelseenergi. Med penetrator avses splitter, projektiler eller RSV-strålar. Projektiler får hela sin rörelseenergi vid utskjutningen, exempelvis från handeldvapen, kanoner eller raketer.

Splitter resp. RSV-strålar bildas genom att sprängämnet i stridsdelen detonerar i anslutning till målet. De får huvuddelen av sin rörelseenergi från sprängämnet men även stridsdelens hastighet bidrar.

Även mellanformer som exempelvis halvpansargranater (pansarbrytande projektil med sprängämne för restverkan inne i målet) förekommer.

3.1 Projektiler⁵

Med projektiler avses här sådana penetratorer som accelereras till sin fulla hastighet i ett eldrör eller med hjälp av en raket. Dessa indelas i finkalibriga (< 20 mm kaliber), mellankalibriga (20-60 mm kaliber) och grovkalibriga (> 60 mm kaliber) projektiler.

Kraven på samtliga dessa projektiler är att de förutom att ge god verkan i målet, måste utformas för att klara utskjutningspåkänningarna, inte bromsas för mycket i luften, gå stabilt och uppträda på ett repeterbart sätt så att de träffar målet.

5. Projektil = kropp som skjuts ut från ett vapen eller som kastas med ett vapen. Exempel på projektiler är en sten som kastas med en slunga, en pil som skjuts med en båge, en kula som skjuts från en pistol och en granat som skjuts från en haubits. (Källa: Nationalencyklopedin). I detta avsnitt behandlas främst penetrationsegenskaper varför tyndpunkten är lagd på s.k. inerta (utan sprängämnesfyllning) projektiler. Granater (sprängämnesfyllda projektiler), som förekommer i nästan alla här nämnda kalibrer behandlas främst under "splitterstridsdelar".

Utskjutningspåkänningarna kan i många fall vara gränssättande för projektilutformningen. Till exempel kan alltför långa och slanka projektiler (något som är gynnsamt ur penetrationssynpunkt) få problem med knäckning och böjsvängningar i eldröret om projektilen inte ges erforderligt drivspegelstöd.

Luftbromsningen påverkas huvudsakligen av förhållandet mellan projektilens tvärsnittsarea, dess massa, och av projektilens geometri. Dessa krav strider dock sällan mot kraven på stort genomslag.

För att projektilen inte ska välta i luften måste den stabiliseras (se även avsnitt 10.5). Detta görs antingen gyroskopiskt genom rotation (t.ex. med hjälp av räfflade eldrör), eller aerodynamiskt (t.ex. med hjälp av fenor). Rotationsstabilisering kan användas på fullkalibriga eller måttligt underkalibriga projektiler, medan fenstabilisering används på de slankaste projektilerna (pilarna). Stabilisering av projektilen är nödvändig dels för att inte projektilen skall tumla/välta i luften vilket skulle medföra lägre precision och kortare räckvidd, dels för att få maximal penetration.

3.1.1 Finkalibriga projektiler

Finkalibriga projektiler med kaliber 4,65-9 mm, används i militära sammanhang i första hand för att bekämpa fientlig personal. De grövre varianterna (t.ex. projektiler för tunga kulsprutor) utformas däremot oftast för att slå ut fientlig materiel, vilket innebär att de normalt är av pansarbrytande typ och förses med brand- och/eller sprängsatser. Dessa har ofta kalibern 12,7-14,5 mm. En komplett patron beskrivs i avsnitt 10.1 och 10.4.

Projektilen består normalt av en kärna, som är den huvudsakliga genomslagskroppen, och en utanpåliggande mantel (normalt av koppar/zink-legeringen tombak eller tombakpläterat mjukt stål). Manteln är avsedd att minska rengöringsbehovet och slitaget av pipan, samt hålla ihop den ofta mjuka kärnan. Haag-deklarationens förbud mot projektiler med hålspets och skåror från 1899 har medfört att militär ammunition normalt är helmantlad. I civila sammanhang förekommer dock andra projektiltyper, som t.ex. hålspetsprojektiler och halvmantlade projektiler (projektiler där manteln inte täcker spetsen på en deformierbar kärna).

Vanliga kärnmaterial är för antipersonellt bruk antimonlegerat bly, mjukt eller härdat stål och kombinationer av dessa. För detta ändamål är det vanligt att den främre delen av kärnan består av ett lättare material, eller till och med ersätts med ett hålrum, i avsikt att åstadkomma projektilvältning i mjuka mål (vilket ger förhöjd verkan i oskyddad personal). För bekämpning av lättare ballistiskt skyddade mål såsom personal med kroppsskydd eller fordon, används

pansarbrytande ammunition med kärnor av hårt stål, ”tungmetall”⁶ och hårdmetall (volframkarbidkomposit).

Spårlysprojektiler används för eldkorrigerering och synliggör projektilbanan med hjälp av en lyssats i projektilens bakdel. Brand- och sprängprojektiler ger ytterligare verkans effekter genom att brand- och eller sprängsatser antänder bränsle och ammunition eller ger ökad restverkan. Ovan nämnda projektilvarianter kombineras ofta.

- Ammunition för pistoler, revolverar och k-pistar

Pistol- och revolverammunition förekommer i ett stort antal kalibrer. För militärt bruk är i dagsläget kalibern 9 mm dominerande. Projektilerna är oftast rundnosade, med en kärna av bly och/eller mjukt stål (”ball”-ammunition) och skjuts med relativt låga hastigheter, typiskt 250-350 m/s med pistol och 400-450 m/s med kpist. Pansarbrytande ammunition med härdade stålkärnor börjar bli vanligare (främst i öst) och projektiler med hårdmetallkärna förekommer, även om dessa i dagsläget hör till ovanligheterna. Den svenska 9 mm m/39B (som skiljer sig från vanlig 9 mm ammunitionen genom att den har en osedvanligt tjock stålhatta i spetsen) har, liksom öststatsammunition med stålkärnor, en betydligt större genomslagsförmåga än normalammunition i hårdare mål.

Under de senaste decennierna har ett flertal nya ammunitionstyper tillkommit, som är avsedda att penetrera lättare kroppsskydd. För de kompakta och effektiva närstridsvapen (Personal Defence Weapons) som utvecklats för dessa ändamål krävs ammunition med små och snabba projektiler som ger liten rekyl och god penetrationsförmåga (kroppsskyddspenetration).

I civila sammanhang förekommer även icke helmantlade projektiler, konstruerade för att deformeras vid anslag mot levande vävnad. Dessa ger i allmänhet något större vävnadsskador (och därmed verkan) än motsvarande helmantlade projektiler. Ett ökande antal polisstyrkor använder deformerande projektiler i syfte att lättare stoppa angripare (Haag-deklarationen förbjuder bara militär ammunition). Även den svenska polisen har nyligen infört sådan ammunition till sina tjänstepistoler (SPEER Gold Dot), se *Figur 3.1*. Projektilen är av s.k. hålspetstyp, där en hålighet i projektilspetsen tillsammans med försvagningar i manteln möjliggör snabb expansion (deformation till större kaliber) i vävnad. En annan fördel är att risken för tredje man minskar dels p.g.a. minskad risk för genomslag, dels på grund av den minskade risken för rikoschetter.

6. Tungmetall, som det används här, definieras närmare i avsnitt 3.1.3.



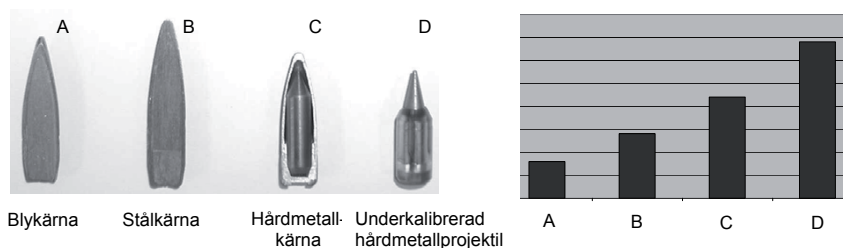
Figur 3.1. Ammunition med hålspets till polisens tjänstepistoler. (Källa: FOI)

- Ammunition för automatkarbiner, lätta kulsprutor och lätta prickskyttevapen

Denna typ av projektiler utgör det största finkaliberhotet mot personal och lättare stridsfordon. Projektilerna är mer spetsformade än pistolammunition, har oftare en hårdare kärna och skjuts med högre hastigheter, 700-1000 m/s. Denna typ av ammunition ger alltså högre verkan och längre verkansavstånd än pistolammunition.

Kalibern 7,62×51 mm är tillsammans med den senare utvecklade 5,56×45 mm den idag helt dominerande kalibern i västvärlden för automatkarbiner och kulsprutor samt prickskyttegevär. I öst används mindre projektiler i automatkarbiner 7,62×39 mm och 5,45×39 mm. För kulsprutor och prickskyttegevär används i öst också ammunitionstypen 7,62×54R.

I varje ammunitionstorlek förekommer många varianter av projektiler med mycket varierande prestanda. Inträngningsförmågan i pansarstål spänner mellan några mm för standardprojektiler med mjuk blykärna till uppemot 35 mm för den svenska underkalibriga ammunitionstypen s.k. ptr 10 prick.



Figur 3.2. Exempel på olika projektiltyper, med samma kaliber men olika projektilmaterial, och deras resp. inträngningsförmåga i pansarstål. A. blykärna, B. stålkärna, C. hårdmetallkärna och D. underkalibrig hårdmetallprojektil. (Källa: FOI)

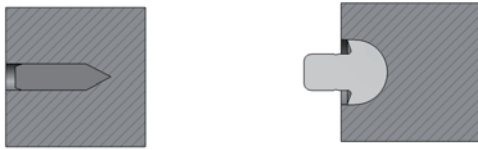
- Ammunition för tunga kulsprutor och prickskyttevapen

Ammunition för denna typ av vapen är huvudsakligen avsedd för bekämpning av materiel och förekommer i kalibrerna 12,7 resp. 14,5 mm. Projektilerna har en massa på 45-65 g och en hastighet av 850-1 000 m/s. Spårsljus är vanligt, liksom specialammunition med pansarbrytande eller brandalstrande verkan.

Kalibern 12,7×99 mm är den helt dominerande tunga kulsprutekalibern i väst och bestyckar allt ifrån stridsbåtar till stridsfordon och flygplan. Det forna östblockets motsvarighet har storleken 12,7×108 mm och är prestandamässigt relativt likvärdig den västerländska. I öst förekommer också kalibern 14,5×114 mm som ursprungligen togs fram under andra världskriget för bekämpning av tyska stridsvagnar.

- Penetrationsegenskaper för finkalibriga projektiler⁷

Finkalibriga projektilers penetrationsförmåga i målmaterial beror väsentligen på förhållandet mellan målmaterialiets och projektilmaterialiets hållfasthet samt på projektilens geometri och hastighet. Maximal penetrationsförmåga erhålls om projektilens kärna har så hög hållfasthet att den inte deformerar vid inträngning i målet. Om projektilen deformerar blir spetsen trubbigare och får därmed en mindre gynnsam form för inträngning. Effekten av detta illustreras tydligt i *Figur 3.2* där projektil C och D har höghållfasta projektilkärnor som inte deformerar vid inträngningen medan projektil A och B har lägre hållfasthet och deformerar mer (A) eller mindre (B) kraftigt. Hur projektilerna deformerar, beroende av hållfasthet, framgår av *Figur 3.3*.



Figur 3.3. Penetration vid projektilkärna med: hög hållfasthet så att den inte deformerar (vänster) resp. lägre hållfasthet så att den deformerar (höger). (Källa: FOI)

Målplåtens tjocklek har också betydelse för penetrationsförloppet då helt olika penetrationsprocesser kan inträffa om plåten är så tunn att den buktar ut vid belastningen eller om den är styv så att endast ytan under projektilen bidrar till att stoppa projektilen, se *Figur 3.4*. Eftersom det i finkalibersammanhang oftast är frågan om relativt tunna målplåtar har randeffekterna vid anslag mot och utträde ur plåten stor betydelse. Med randeffekter menar man vad som händer vid ytorna.

7. Se även avsnitt 5.1.5.



Figur 3.4. Exempel på penetrationsförlopp vid olika tjocklek på målplåt. (Källa: FOI)

I många moderna pansarkonstruktioner utnyttjas skiktningar och geometriska utformningar som syftar till att slå sönder projektilerna. Projektilkärnan måste då kunna motstå denna typ av belastning vilket gör att spröda projektilmaterial är mindre lämpliga.

Projektilens hastighet har också betydelse för penetrationsförmågan vilket framgår av skillnaden mellan inträngningsförmågan hos projektilerna C och D i *Figur 3.2*, där projektil D har ca 500 m/s högre hastighet än projektil C. Denna effekt erhålls dock inte i samma utsträckning om hållfasthetsförhållandet mellan projektil och mål är sådant att den förhöjda projektilhastigheten medför att projektilen, vid den högre belastningen som då uppstår, övergår från att kunna penetrera stelt till att deformeras vid inträngningen. En utförligare beskrivning av hur de olika parametrarna ovan påverkar penetrationsförmågan ges under avsnitt 5.1.

För att öka finkalibriga projektilers penetrationsförmåga i hårda målmaterial kan man alltså öka hållfastheten hos projektilmaterialet under förutsättning att materialet inte blir för sprött. Ett annat sätt är att öka projektilens hastighet under förutsättning att projektilens hållfasthet är så hög att den håller ihop vid den ökade belastningen. Om hastigheten är hög kan man också överväga att utforma projektilens geometri så att den blir längre.

Observera att resonemangen ovan gäller för inträngning i skyddade objekt. För verkan i oskyddad trupp är den gamla typen av blyprojektiler fullt tillräckliga för att penetrera kroppen och ge verkan.

3.1.2 Mellankalibriga projektiler

Med mellankalibriga projektiler menas pansarbrytande projektiler som skjuts från vapen med kalibrer från 20 till 60 mm. Projektilerna används mot alla typer av pansrade mål utom stridsvagnsfronter, d.v.s. mål med pansarskydd motsvarande från ca 10 till 200 mm pansarstål. Det finns få skydd som har en skyddsnivå motsvarande >200 mm pansarstål.

Det finns ett stort antal olika projektiltyper i mellankaliberklassen, både vad gäller projektilgeometri, projektilmaterial och projektilhastighet. För de större kalibrerna i klassen är projektilerna normalt slankare, längre och gjorda av material med högre densitet än för projektiler av mindre kaliber.

En grupp mellankalibriga projektiler består av rotationsstabiliserade stålprojektiler med litet längd-diameter-förhållande (slankhetstal), vanligen av storleksordningen 3-5. Dessa är oftast utformade med en ogival⁸ nos och har ett ihåligt bakstycke som kan fyllas med olika stridsmedel som brandtillsatser och sprängämnen. Utskjutningshastigheten ligger vanligen i intervallet 700-1 000 m/s. Denna projektil-typ är vanligt förekommande i kalibrer mellan 20 och 30 mm. Projektilerna betecknas oftast AP, AP-I resp. AP-T där AP står för pansarbrytande projektil (engelskans "armour piercing"), I för projektil med brandtillsats (engelskans "incendiary") och T för projektil med spårlyus (engelskans "tracer").

Nästa grupp mellankalibriga projektiler består av homogena projektiler med större slankhetstal, vanligen runt 5 eller över. Dessa projektiler är rotationsstabiliserade och oftast underkalibriga, d.v.s. penetratorn har mindre diameter än eldröret. Penetratorn är vanligen av hårdmetall, tungmetall eller utarmat uran. Utskjutningshastigheten ligger vanligen mellan 900 och 1 100 m/s. Projektiltypen är vanligt förekommande för kalibrer mellan 20 och 40 mm. Projektilerna kan ha beteckningen AP-HC ("Armour Piercing Hard Core") eller APDS ("Armour Piercing Discarding Sabot") vilket betyder att det är en pansarbrytande projektil med kärna av hårt material respektive en underkalibrig pansarbrytande projektil med separerande drivspegel.

Den i framtiden troligen vanligaste gruppen av mellankalibrig ammunition är dock projektiler med stort slankhetstal, vanligen 10-25. Dessa projektiler är underkalibriga och fenstabiliserade, med en penetrator av tungmetall eller utarmat uran som skjuts med hastigheter mellan 1 200 och 1 600 m/s. Beteckningen för denna typ av projektil APFSDS ("Armour Piercing, Fin Stabilised, Discarding Sabot")

Figur 3.5 visar exempel på projektiler ur de olika grupperna av mellankalibriga projektiler.

8. Nosens "kontur" utgörs av en del av en cirkelbågar.



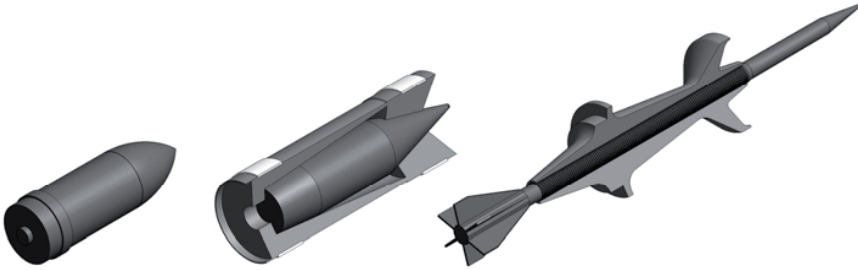
Figur 3.5. Exempel på fr. v. API-, APDS- och APFSDS-projektiler. (Källa: FOI)

Fullkalibriga och rotationsstabiliserade mellankalibriga projektiler har, p.g.a. sin utskjutningshastighet och projektilgeometri, i stort sätt samma penetrationsegenskaper som finkalibrig pansarbrytande projektiler, medan de fenstabiliserade mellankalibriga projektilerna beter sig som de grovkalibriga pilprojektilerna under penetrationsprocessen.

3.1.3 Grovkalibriga projektiler

Grovkalibriga projektiler är huvudsakligen avsedda för bekämpning av stridsvagns front. Den idag helt dominerande projektiltypen är pilprojektiler som kännetecknas av att de har hög hastighet (över 1 500 m/s), är slanka (har längd-diameterförhållande över 15) och är tillverkade av ett material med hög densitet.

Fram till 1950-talet utformades grovkalibriga projektiler som fullkalibriga projektiler av stål och mot slutet av perioden även av hårdmetall (volframkarbid). Genomslagsförmågan ökades genom att öka kanonens kaliber och var vid denna tid typiskt ca 2 kalibrer. Därefter började även underkalibriga rotationsstabiliserade hårdmetallprojektiler att användas vilket gav större genomslag. Kanonernas kalibrer var nu upp till 105 mm. På 60-talet börjar hårdmetallen ersättas med tungmetall (volframkomposit) vilket förbättrar genomslagsförmågan särskilt i skiktade mål och i öst införs de första fenstabiliserade pilprojektiler. På 1970-talet införs pilprojektiler även i väst där också utarmat uran börjar användas som projektilmaterial. Kanoner med kalibrerna 120 mm (väst) resp. 125 mm (öst) utvecklas. Idag används uteslutande fenstabiliserade pilprojektiler i grovkalibriga kanoner och de börjar även dominera på mellankalibersidan. *Figur 3.6* visar hur dessa projektiler utvecklats från 2:a världskriget fram till millennieskiftet.



Figur 3.6. Utvecklingen från fullkalibrig rotationsstabiliserad projektil, via underkalibrig rotationsstabiliserad projektil, till underkalibrig fenstabiliserad pilprojektil. (Källa: FOI)

Utvecklingen går mot allt större slankhetstal och större kalibrer. För närvarande ligger slankhetstalet kring 30 och det finns prototypkanoner med 140 mm kaliber. Genomslagsförmågan för de modernaste pilprojektilerna är nu mellan en halv och en meter pansarstål.

- Pilprojektilers uppbyggnad

Pilprojektiler är kraftigt underkalibriga och centreras i eldröret med hjälp av en drivspegel. Pilarna görs så långa och slanka som möjligt för att maximera penetrationsförmågan. Begränsande för hur långt man kan driva detta är dels att ammunitionen måste gå att hantera och dels att pilen måste tåla de krafter den utsätts för under accelerationen.



Figur 3.7. Modern pilprojektil strax efter mynningen då drivspeglarna separerar. (Källa: FOI)

Pilarna byggs ibland upp av ett antal cylindriska delar, ofta i form av en huvudkärna och en framände som består av ett antal kortare delar som kallas kärnstöd. Kärnstöden fästs normalt till huvudkärnan med ett aluminiumhölje som ger projektilen en gynnsam aerodynamisk form. Kärnstöden kan ibland ha annan hållfasthet och täthet än huvudkärnan och tanken med denna

uppbyggnad är att kärnstöden skall konsumeras i de yttre delarna av ett sammansatt pansar utan att överföra snedkrafter på huvudkärnan. Denna kan då träffa huvudpansaret utan att snedställas vilket ger huvudkärnan maximal penetration. Denna utformning ger pilen penetrationsegenskaper som är skräddarsydda mot en given måltyp. För att göra pilen mer okänslig för variationer i pansarutformningen görs genomslagskroppen numera som en enda cylinder.

De material som huvudsakligen används i pilprojektiler är tungmetall och utarmat uran (engelska "Depleted Uranium", DU). Även stål förekommer, bland annat i ammunition från f.d. öststaterna. Tungmetall och utarmat uran används därför att de har hög densitet och god hållfasthet vilket är önskvärda egenskaper vid accelerationen i eldröret, under flykten genom luften fram till målet samt vid penetrationen av målet (innerballistiskt, ytterballistiskt och slutballistiskt). Tungmetall har volfram⁹ som huvudbeståndsdel. Densiteten kan variera mellan ca 17 000 och 18 500 kg/m³ och hållfastheten avtar normalt med ökande densitet. Utarmat uran som projektmaterial är ofta uran legerat med 0.75 % titan. Densiteten för denna legering är ca 18 500 kg/m³.

utarmat uran är något bättre än tungmetall ur penetrationssynpunkt. En annan skillnad är att utarmat uran är pyrofort d.v.s. de delar av projektilen som kommer in i fordonet efter genomslag av pansaret tar eld. Detta ökar sannolikheten för att målet slås ut. I NATO används utarmat uran av de amerikanska, brittiska och franska styrkorna medan övriga nationer, delvis av politiskt/psykologiska skäl, inte gör det. Utarmat uran och tungmetall är ungefär lika hälsovådliga ur toxikologisk synpunkt (giftsynpunkt). Den radiologiska risken med utarmat uran brukar anses jämförbar med den toxikologiska. Utarmat uran finns i stora mängder som en avfallsprodukt från kärnbränslehanteringen och är billigt. Volfram är relativt dyrt, men det enklare sättet att framställa och hantera dessa projektiler gör att slutpriset för ammunition tillverkad av utarmat uran och tungmetall är av samma storleksordning.

Drivspegelns funktion är, förutom att centrera projektilen, att täta mot eldröret och att överföra krafterna från krutgaserna till pilen. Drivspegelvikten utgör en betydande del av den utskjutna vikten. För att få hög hastighet på projektilen är det därför av stor betydelse att hålla nere vikten på drivspegeln, vilket lett till att flera olika drivspegelgeometrier har tagits fram. Drivspegelarna görs vanligen av höghållfast aluminium och utformas så att de separerar från pilen då denna passerar mynningen. Detta åstadkoms vanligen genom att drivspegeln delas upp i tre längsgående segment. Segmenten hålls ihop med hjälp av ett plastförband som bryts upp av trycket från luften och eventuella rotationskrafter vid mynningspassagen. En del pilar förses även med spårlyus för att underlätta träffbedömningen.

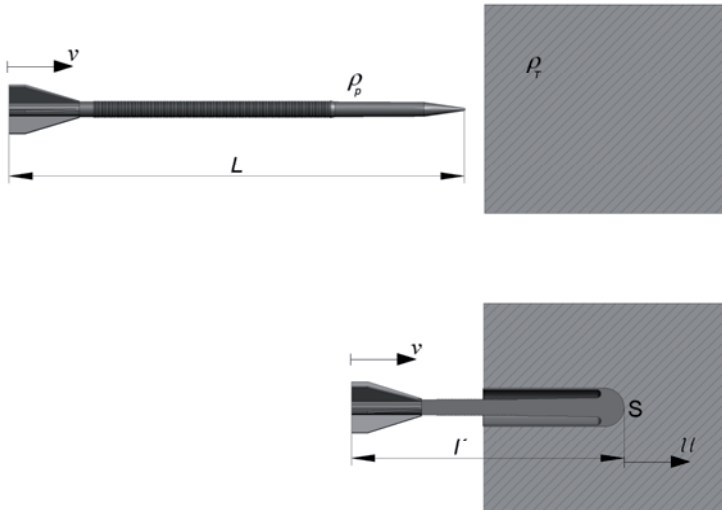
9. "Tungsten" på engelska. Metallen "upptäcktes" av den svenske kemisten Karl Scheele år 1781: Han kallade den inledningsvis "tung sten".

Pilammunition förekommer i både patronerat och delat utförande. Patronerad ammunition är numera, i väst, vanligast för kalibrer upp till 120 mm, i öst har delad ammunition varit något vanligare. Om större kalibrer införs måste förmodligen delad ammunition införas av hanteringskäl.

- Penetrationsegenskaper för pilprojektiler¹⁰

Vid pilprojektilers penetration av pansar konsumeras pilen p.g.a. den höga hastigheten (1 500 m/s och uppåt) i stället för att deformeras och bromsas som sker för projektiler med lägre hastighet. Detta innebär att projektilen efter penetration av pansaret har ungefär samma hastighet som vid anslaget men är kortare. En slutsats av detta är att projektilen måste ha en tillräcklig absolut längd för att komma igenom pansaret.

Inträngningsförloppet kan schematiskt beskrivas som att pil- och målmaterial i kontaktytan kastas ut åt sidorna ungefär som då en vattenstråle penetrerar sand. Detta beror på att kontaktkrafterna mellan projektil och mål är så stora att projektilspetsen och målmaterial som är i kontakt med denna deformeras mycket kraftigt. Resten av projektilen är i stort sett opåverkad av vad som händer i hålbotten. Penetrationsförloppet upphör då pilen är konsumerad.



Figur 3.8. Penetrationsförloppet för en modern höghastighetsprojektil. (Källa: FOI)

10. Se även avsnitt 5.1.5.

De parametrar som primärt påverkar inträngningsförmågan är projektillängd, projektilhastighet, målmaterialets hållfasthet samt projektilens och målets densitet. Projektilmaterialets hållfasthet har liten inverkan i homogena mål men däremot stor betydelse i skiktade och vinklade mål. Projektildiametern (och därmed indirekt projektilmassan) påverkar inte inträngningen lika mycket som projektillängden gör.

- Verkan efter penetration

En pilprojektil konsumeras under penetrationen av pansaret. Detta innebär, som nämnts ovan, att den restprojektil som kommer in i vagnen har ungefär samma hastighet men mindre massa än den ursprungliga projektilen. Restprojektilens massa beror således av pansarets tjocklek. Resonemanget gäller dock inte om projektilen nått och jämnt penetrerar pansaret. I detta fall blir både resthastighet och massa liten.

Verkan efter genomslag åstadkoms huvudsakligen av projektilrester men ett visst bidrag fås även från sekundärsplitter från pansarets baksida. Projektilsplittren kastas ut som en koncentrerad kärve i skjutriktningen medan sekundärsplittren kastas ut i alla riktningar.

Är projektilmaterial utarmat uran brinner projektilresterna vilket ökar verkan i vagnen.

Förutom den verkan som åstadkoms inne i vagnen efter genomslag kan projektilens höga rörelseenergi ge stöt- och strukturskador på vagnen. Även om projektilen inte slår igenom pansaret kan således en viss verkan erhållas.

3.2 Splitterstridsdelar

Splitter är ett mängdhot som alltid förekommer i en krigssituation och som utgör grundskyddsnivån för alla typer av ballistiskt skydd. Gemensamt för alla splitterstridsdelar är att de består av ett hölje fyllt med sprängämne och en initieringsdel. Då sprängämnet detonerar brister höljet och bildar ett stort antal splitter som kastas ut från stridsdelen. Höljet är vanligen av homogent stål men kan också bestå av färdigformade splitter. Effektiv styrd fragmentering är dock svår att uppnå på stridsdelar som utsätts för kraftig acceleration vid utskjutning.

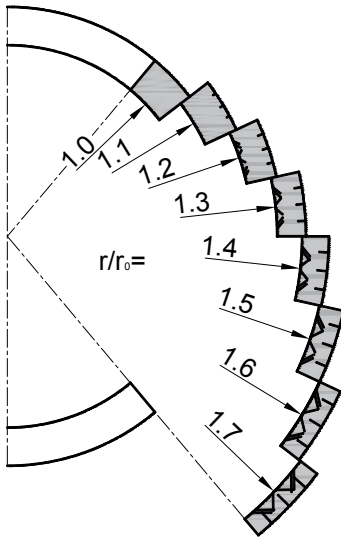
Tryckverkan från sprängämnesdetonationen kan orsaka skador nära brisadpunkten, men det är splittren som ger det klart största verkansbidraget eftersom de verkar över en betydligt större yta. Verkan av splittren beror av dess massa, hastighet, form och material. För förfragmenterade stridsdelar är det relativt lätt att förutse verkan eftersom man vet vilka splitter de genererar.

3.2.1 Splitterstridsdelars fragmentering

Naturligt fragmenterade stridsdelar, d.v.s. stridsdelar med homogena höljen, ger vid brisaden upphov till en kontinuerlig fördelning av splitterstorlekar och splittermassor. Fragmentering av stridsdelar går till på ett helt annat sätt än då t.ex. ett tryckkärl havererar. I stridsdelsfallet uppkommer ett mycket stort antal små splitter medan det i det andra fallet bildas ett fåtal stora fragment. Anledningen till denna skillnad är det extremt snabbt pålagda och höga trycket och att man medvetet valt ett sprött material.

När sprängämnet initieras kommer höljet att expandera radiellt av de uppkomna stötvågorna och höga gastrycken. När höljet expanderar blir den lokala töjningen i höljets ytteryta så stor att dragsprickor uppstår. När höljet trycks ihop i radiell led vill det expandera i ringled. Då detta inte hinner ske vid dessa snabba förlopp uppstår tryckspänningar som tillfälligt hejdar sprickornas vidare utveckling.

Expansionen av höljet gör dessutom att höljet plasticeras – ett stort antal glidlinjer uppstår i 45° vinkel mot radien. Denna skjuvning av höljets innerdel blir så stor att skjuvbrottsprickor uppstår. När de inifrån och utifrån kommande sprickorna möts är fragmenteringen fullbordad. Höljet kan expandera 50-100% innan det fragmenterar. Skillnaden mellan sprängämnesbriserade höljen och långsammare expanderande höljen är att de radiella dragsprickorna stoppas upp så att flera sådana kan bildas.



Figur 3.9. Expansion av splitterstridsdelshölje. (Källa: FOI)

För att räkna ut massfördelning och antalet splitter som erhålls vid fragmenteringen har empiriska modeller framtagits som bygger på en via experiment framtagen fragmenteringskonstant γ_0 som är unik för varje kombination av höljesmaterial och sprängämne. Inverkan av granatens geometri bestäms via fragmenteringstalet γ som beror av fragmenteringskonstanten samt granatens ytterdiameter d_y och höljets tjocklek t . Vid cylindriska höljen av stål kan fragmenteringstalet uttryckas som

$$\gamma = \gamma_0 e^{-(26,4d_y + 15,8\frac{t}{d_y})}$$

Eftersom granatens diameter varierar längs dess längdaxel kommer också fragmenteringstalet att variera längs denna. Vid en fragmenteringsanalys uppdelas därför granaten i ett antal skivor vinkelrätt mot längdaxeln.

Antalet splitter $N(m)$ med massa större än m som genereras vid fragmenteringen kan med hjälp av fragmenteringstalet beräknas genom

$$N(m) = \gamma M_0 \int_m^{\infty} \frac{e^{-\gamma x}}{x} dx$$

där M_0 är totalmassa för stridsdelshölje eller den skiva av granaten som studeras. Formlerna är rent empiriska och gäller för stridsdelar med upp till ca 0,2 m diameter.

För beräkning av fragmentering av stridsdelar med diameter större än 0,2 m används i stället Mott och Linfoots samband

$$N(m) = \frac{M_0}{2M_k^2} e^{-\frac{m^{1/2}}{M_k}}$$

där M_k är ett samband motsvarande fragmenteringstalet och bestäms med en empiriskt framtagen konstant B_2 samt stridsdelens geometri uttryckt i höljets innerdiameter d_i och tjocklek t :

$$M_k = B_2 t^{5/6} d_i^{1/3} \left(1 + \frac{t}{d_i}\right)$$

Formlerna enligt Mott-Linfoot bör användas endast för beräkningar på stora stridsdelar.

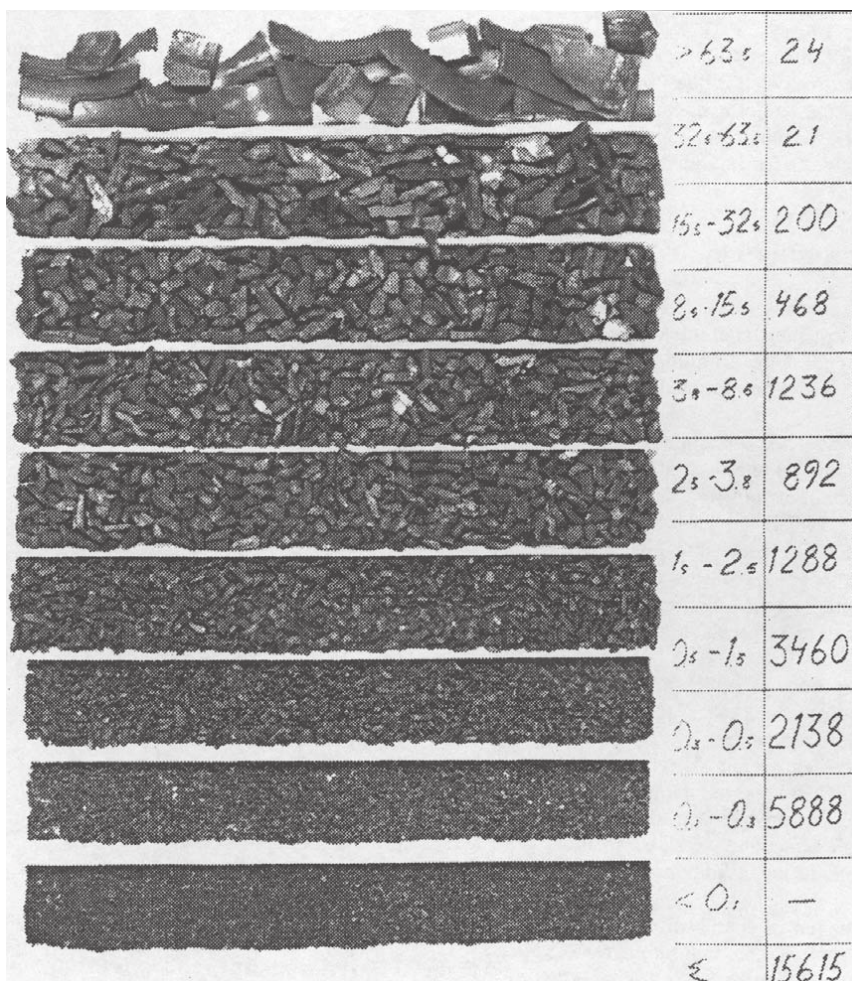
Tabell 3.1. Antal splitter i olika massklasser för olika typer av stridsdelar (experimentellt uppmätta värden)

| Stridsdelstyp | Antal splitter med massan | | |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|-------|
| | >0,5 g | >5 g | >10 g |
| Handgranat (m/67) | <10 | - | - |
| 10,5 cm sgr (m/60z) | 3000 | 300 | 200 |
| 15,5 cm sgr (m/54) | 4300 | 1300 | 800 |
| 15,5 cm sgr (m/77T) | 7600 | 1500 | 500 |
| 250 kg Minbomb (Mk 82) | 15000 | 5000 | 3000 |
| Substridsdel (BLU 26) ¹ | 300 stålkulor á 0,7 g | - | - |
| Raket 128 mm (YMRM 32) ² | 4000 stålkulor á 0,5 g | 1000 stålkulor á 4 g | - |

1) 670 stycken BLU 26 per multipelstridsdel => 200 000 kulor över ett 300x900 m stort område.

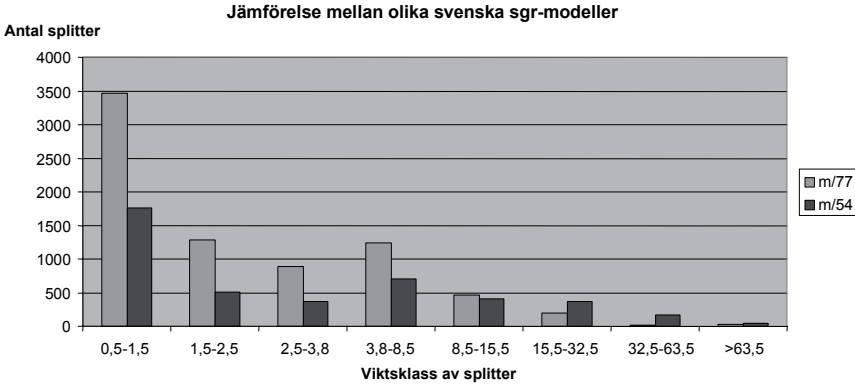
2) 32 raketer per pjäs => 160 000 stycken kulor över ett 400x500 m stort område.

Den vanligaste typen av splitterstridsdel är spränggranaten. *Figur 3.10* visar som exempel splitterfördelningen från en 15,5 cm spränggranat m/77. Granaten har detonerat i en s.k. sprängtrumma varefter splittren samlats ihop, delats in i viktsklasser och räknats.



Figur 3.10. Splitterfördelning från 15,5 cm spränggrat m/77. (Källa: FOI)

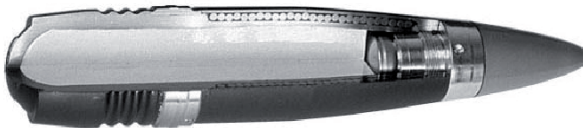
Splitterfördelningen från en splitterstridsdel kan, enligt ovan, i viss mån anpassas genom lämpligt val av höljesmaterial, höljesgeometri och sprängämne varför granater med samma kaliber kan uppvisa relativt stora skillnader vad gäller splitterfördelningen. Sgr m/77 är optimerad mot oskyddad trupp och ger med det stora antalet små splitter hög träffsannolikhet och tillräcklig verkan. Om splittren ska verka på långt avstånd och ge verkan även i skyddade mål kan stridsdelstyper med större och därmed färre splitter behövas. Verkansförmågan hos enskilda splitter höjs på bekostnad av träffsannolikheten. *Figur 3.11* (och tabell 3.1) visar skillnaden i splitterfördelning mellan spränggranater i samma kaliber men av olika modell.



Figur 3.11. Splitterfördelning från 15,5 cm spränggranat m/77 resp. m/54. (Källa: FOI)

Förutom de ovan diskuterade möjligheterna att påverka fragmenteringen för stridsdelar med homogena höljen kan höljet förses med spår mm som ger upphov till spänningskoncentrationer där man vill att höljet ska brista, så kallad styrd fragmentering. Det enklaste och effektivaste sättet att åstadkomma styrd fragmentering är att förse höljets inneryta med v-formade spår. Spårens djup och vinkel måste avvägas så att höljet inte spricker upp för tidigt, med sprängämnesläckage och sänkta utkastningshastigheter som resultat.

Det förekommer också helt förfragmenterade stridsdelshöljen, d.v.s. höljen som byggs upp av färdigformade splitter som sammanfogas med något slag av bindemedel, t.ex. härdplast. Fördelen med sådana höljen är att splittrens storleksfördelning är fullständigt bestämd, att splittermaterialet kan väljas fritt och att splittrens form kan varieras. Nackdelen är att splitterhastigheten blir lägre på grund av sprängämnesläckage, att stridsdelens hållfasthet blir låg och att den blir dyrare än en stridsdel med ett homogent hölje. Ofta förstärks därför förfragmenterade stridsdelar med ett tunt stålhölje som dels håller ihop stridsdelen, dels ger bidrag till verkan.



Figur 3.12. 40 mm kulspränggranat 3P. (Källa: Bofors)

3.2.2 Splittrens hastighet och riktning

Splittrens utkastningshastighet v beror främst av förhållandet mellan sprängämnets och höljets massa men också av sprängämnestyp och kan för homogena höljen beräknas t.ex. med hjälp av Gurney-formeln för cylinderladdning

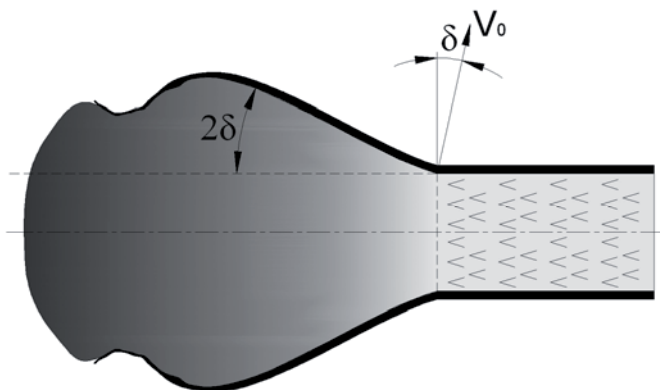
$$v = (2E)^{1/2} \left(\frac{M/m}{1 + \frac{1}{2}M/m} \right)^{1/2}$$

där E är sprängämnets specifika energi, M sprängämnets massa och m höljets massa.

Splittren kastas approximativt ut vinkelrätt mot gränsytan mellan sprängämne och hölje. Detta gäller exakt då detonationsvågen faller in vinkelrätt mot höljet, vilket det i praktiken inte gör. Den maximala vinkelavvikelsen δ fås vid strykande infall (d.v.s. detonationsvågen går parallellt med höljet) och följer då Taylors utkastningsformel vid strykande infall

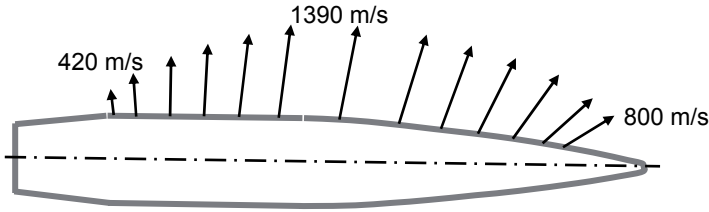
$$\sin \delta = \frac{v}{2U_D}$$

där v är utkastningshastigheten och U_D är sprängämnets detonationshastighet. Strykande infall förekommer knappast i renodlad form men formeln brukar användas för beräkningar på långa, cylindriska verkansdelar.



Figur 3.13. Utkastningsvinkeln vid strykande infall. (Källa: FOI)

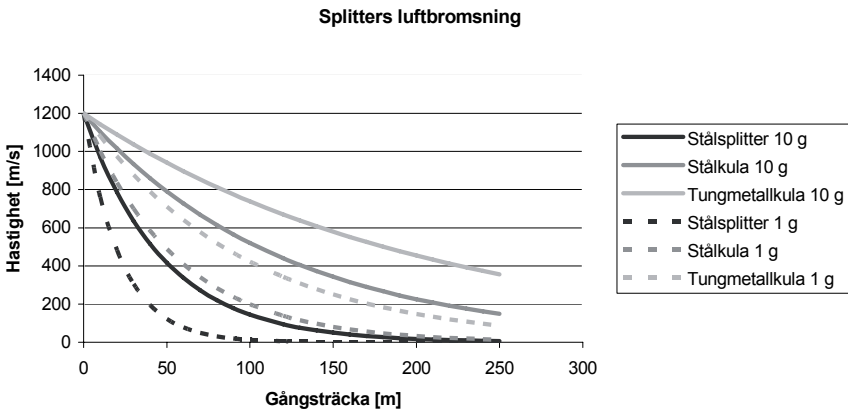
För att få splittrens utkastningshastighet och riktning från en flygande granat måste dessutom granathastigheten läggas till utsprängningshastigheten genom vektoraddition. *Figur 3.14* visar som exempel utkastningshastighet och utkastningsriktning för splittren från en 15,5 cm spränggranat m/77 som flyger med granathastigheten 300 m/s.



Figur 3.14. Figuren visar exempel på utkastningshastighet och utkastningsriktning för splittern från en 15,5 cm spränggranat m/77 som flyger med granathastigheten 300 m/s. (Källa: FOI)

Man kan relativt lätt välja att utforma splitterstridsdelar med verkan endast i bestämda riktningar.

Även om splitterhastigheten initialt är hög, ca 1 200-1 400 m/s, bromsas de relativt snabbt och träffar i regel målet med betydligt lägre hastighet. Luftbromsningen beror på splitters massa, form och hastighet. Stor splittermassa ger längre verkansavstånd. Splitter med hög densitet har, vid given splittermassa, liten tvärsnittsytta och når därmed längre än splitter med samma massa men lägre densitet.



Figur 3.15. Splitters luftbromsning. (Källa: FOI)

Luftbromsningen kan beräknas med Newtons rörelseekvation som

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_D \rho_{luft} v^2 A$$

där m och v är splittrets massa resp. hastighet, C_D luftmotståndskoefficienten (som beror av splittrets form), ρ_{luft} luftens densitet och A är splittrets projicerade yta mot fartvinden¹¹.

Differentialekvationen kan skrivas om med sträckan s som oberoende variabel (i stället för tiden) genom att utnyttja att $dv/dt = v dv/ds$ och antagandet att C_D är konstant. Ekvationen blir då separabel och har lösningen

$$v(s) = v_0 e^{-k_0 s} \quad \text{där} \quad k_0 = \frac{C}{2m} \rho_{luft} A$$

s är gångsträckan och v_0 är begynnelsehastigheten.

Ur denna ekvation kan splittret s.k. halveringssträcka $s_{1/2}$ lösas ut

$$s_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_0}$$

Med halveringssträcka menas att hastigheten halveras varje gång splittret tillryggalagt denna sträcka.

3.2.3 Splitters penetrationsegenskaper

Splitter har framför allt möjlighet att ge verkan i oskyddad soldat och utrustning som är oskyddad, t.ex. standardfordon. Verkan av enskilt splitter beror av splittrens storlek, form och hastighet samt var splittren träffar och vilka organ (soldat) eller komponenter (utrustning) som berörs av träffen. Ett litet splitter kan t.ex. ge bagatellartade skador om det träffar i benet men slå ut synen om det träffar ett öga.

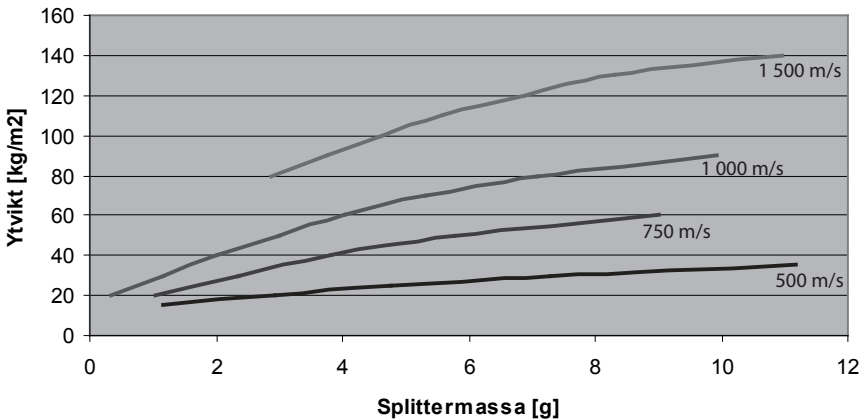
På senare år har splitterskydd införts i stor utsträckning varför splittren ofta först måste penetrera ett ballistiskt skydd innan det kan ge verkan. Avgörande för penetrationsförmågan är splittrens storlek, hastighet, form och densitet. I *Tabell 3.2* visas som exempel hur splitterformen inverkar på genomträngningsförmåga i stål om samtliga splittertyper är av samma material (stål), väger 20 g och träffar med 1 000 m/s.

11. Bo Janzon; "Underlag för verkansberäkningar. Splitters luftmotstånd." FOA 2 rapport, A 2539-44, maj 1971. (Se också under under avsnitt 10.5.)

Tabell 3.2. Exempel på hur splitterformen inverkar på genomträngningsförmåga

| Splitterform | Karaktäristisk längd | Genomträngningsförmåga |
|--------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Oregelbundna småsplitter | | 10 mm |
| Sfär | Ø 17 mm | 11 mm |
| Kub | □ 14 mm | 15 mm |
| Fyrkantig stav | 40×8×8 mm träff med kortsidan | 30-40 mm |

Hur splittermassa och splitterhastighet påverkar genomträngningsförmågan i pansarstål för en standardsplittersimulator (FSP) av stål framgår av *Figur 3.16*.



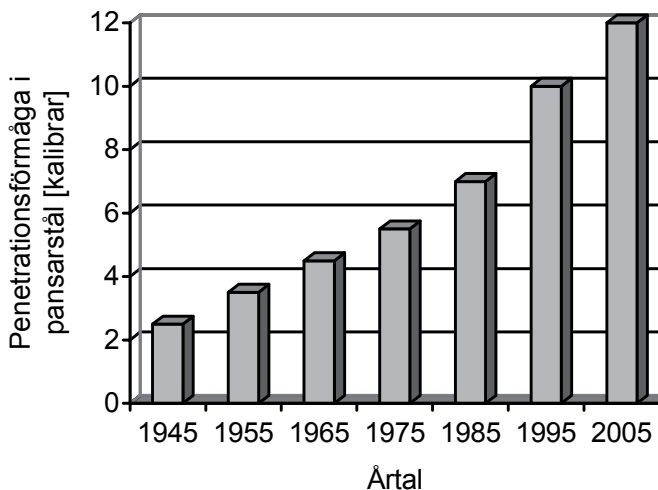
Figur 3.16. Exempel på hur splitterformen inverkar på genomträngningsförmåga. (Källa: FOI)

3.3 RSV-stridsdelar

RSV står för Riktad Sprängverkan och syftar på att sprängämnet i stridsdelen formas så att energin som frigörs vid detonationen koncentreras, riktas, med hjälp av laddningsgeometrin. Effekten erhålls i sin enklaste form om en cylindrisk laddning ligger an mot ett pansar och initieras i den fria änden. Sprängverkan riktas då så att det bildas en grop vid kontaktytan. Om laddningen förses med ett koniskt hålrum i den ände som ligger an mot pansaret riktas sprängverkan ytterligare varvid ett djupare och smalare hål bildas i plåten. Med hjälp av ett tunt metallinlägg som beklär hålrumsväggen, kan den riktade energin användas till att omforma metallinlägget till en effektiv penetrator. Beroende på hur hålrummet och inlägget är utformat bildar metallen i inlägget antingen en stråle som sträcks ut, strålbildande RSV (RSV3), eller en sammanhållen

projektil, projektilbildande RSV (RSV4). Penetratorn rör sig med mycket hög hastighet mot målet och har stor inträngningsförmåga i pansar.

Genomslagsförmågan var under 2:a världskriget 2-3 gånger kalibern. Efter andra världskriget har man arbetat på att öka RSV-laddningarnas prestanda. Genom att förbättra precisionen, optimera geometrin och utveckla bättre sprängämnen och inläggsmaterial har man nu fått fram laddningar med upp till 12 kalibers genomslagsförmåga (mer än 1 meter pansarstål för bärbara laddningar).



Figur 3.17. Penetrationsförmågans utveckling över tiden. (Källa: FOI)

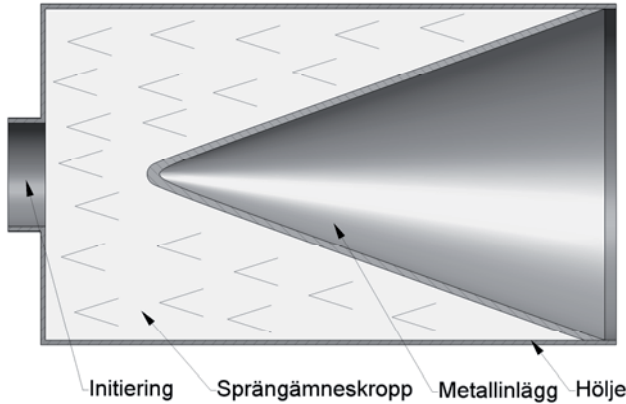
RSV-stridsdelar förekommer i allt från handburna vapen till tunga fordons- eller flygburna pv-vapen.

3.3.1 Strålbildande RSV-stridsdelar

Strålbildande RSV-stridsdelar har en penetrator i form av en mycket lång metallstråle, upp mot en meter lång, som rör sig med extremt hög hastighet, 5 000-10 000 m/s. Stridsdelstypen kallas också RSV-3 eller på amerikanska ”shaped charge”, SC, eller engelska ”hollow charge”.

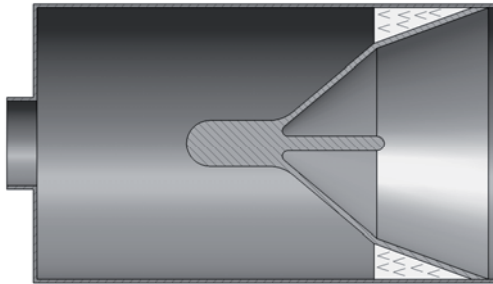
Verkansdelen är vanligen en rotationssymmetrisk sprängämneskropp som omges av ett hölje. I ena änden av sprängämnet sitter en tändanordning och eventuellt en förstärkningsladdning (booster) och/eller en s.k. vågformare. På motsatt sida har sprängämnet ett konformat inlägg av duktil¹² metall, vanligen koppar.

12. ”duktilitet” (av lat. du’ctilis ’ränjbar’), mått på ett materials förmåga att utsättas för plastisk deformation utan sprickbildning. Duktilitet förväxlas ofta med seghet; endast då segheten



Figur 3.18. Strålbildande RSV-laddning. (Källa: FOI)

Vid initiering av stridsdelen bildas en detonationsfront som rör sig framåt genom laddningen. Sprängämnesgaserna utövar ett stort tryck på metallinlägget som då accelereras in mot laddningens och inläggets symmetriaxel. När inlägget kollapsar på symmetriaxeln bildar det en stråle som rör sig framåt med mycket hög hastighet (5 000-10 000 m/s). Resten, vilket utgör huvuddelen av inlägget, bildar en så kallad slugg som har mycket lägre hastighet (500-1 000 m/s).



Figur 3.19. Principskiss som återger hur metallkonen trycks ihop under strålbildningsprocessen varvid strålbildning påbörjats. (Källa: FOI)

I *Figur 3.19* visas en principskiss som återger hur metallkonen trycks ihop under strålbildningsprocessen varvid strålbildning påbörjats.

är mycket låg finns ett direkt samband. Det vanligaste sättet att bestämma duktiliteten hos ett material är att ange (brott)förlängning eller brottkontraktion i ett dragprov. Ett material med hög duktilitet är 'förlåtande', dvs. det kan deformeras kraftigt utan att brott inträffar. En hög duktilitet är en förutsättning för många formningsoperationer, t.ex. plåtpressning och kallstukning." (Källa: Nationalencyklopedin)

Inläggets hastighet vid kollapsen beror av massförhållandet mellan metall och sprängämne samt av sprängämnets detonationsegenskaper. Eftersom förhållandet mellan inläggets och sprängämnets massa varierar utefter laddningens höjd kommer även strålhastigheten att variera. Den främre delen av strålen får en högre hastighet än den bakre. Denna hastighetsskillnad medför att strålen snabbt töjs ut.

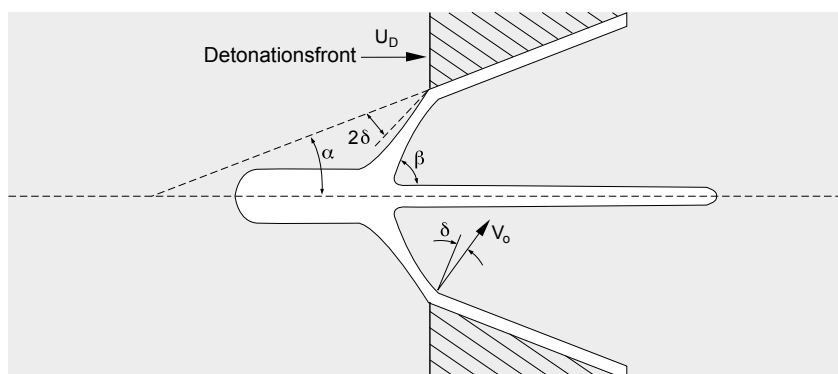
Vid analytisk beräkning av stråldata för RSV-laddningar delas inlägget in i flera cirkulära (ringformade) sektioner. Därefter används samma formler för utkastnings-hastighet v_0 och utkastningsvinkel δ som vid beräkning av splitrerutkast, se avsnittet 3.2.2. Med den så kallade PER-teorin kan sedan strål- och slughastigheterna v_j och v_s resp. strål- och sluggmassorna m_j och m_s beräknas enligt

$$v_j = v_0 \frac{\cos(\alpha + \delta - \beta/2)}{\sin(\beta/2)} \qquad v_s = v_0 \frac{\sin(\alpha + \delta - \beta/2)}{\cos(\beta/2)}$$

$$m_j = \frac{m_0}{2} (1 - \cos \beta) = m_0 \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

$$\frac{m_0}{2} (1 + \cos \beta) = m_0 \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

där m_0 är massan av den aktuella sektionen, α konens halva toppvinkel, och β kollapsvinkeln, d.v.s. den vinkel som inlägget bildar med symmetriaxeln vid kollapspunkten, se *Figur 3.20*.



Figur 3.20. Vinkelförhållandena då metallinlägget i en RSV-kon kollapsar. (Källa: FOI)

Den positiva hastighetsgradienten i strålen gör att strålen utsätts för en kontinuerlig sträckning. Närmast inläggets spets uppkommer dock en negativ

hastighetsgradient som leder till att strålen får ett tjockare första fragment. Den från början mycket korta strålen kan under detta snabba förlopp töjas upp till mer än 10 kalibrers längd innan den brister och splittras i ett antal fragment (vanligen 50-100 stycken). Det är viktigt ur penetrationssynpunkt att få en så lång stråle som möjligt. Som exempel får man från en stridsdel till pv-roboten "Bantam" (kaliber 106 mm) en verksam stråle vars längd är 92 cm och massa är 65 g.

När strålen sedan fragmenterar är det viktigt att det sker på ett sådant sätt att fragmenten inte utsätts för snedkrafter som får dem att rotera. Det antal fragment som uppstår beror av laddningsgeometri, sprängämne och inläggs-material. Processen är, som alla brottprocesser, behäftad med stora spridningar vilket gör att även "likadana" laddningar ger olika antal fragment. Fragmenteringsförloppet kan ännu inte beräknas utan man är än så länge hänvisad till sprängförsök.

- RSV-stridsdelars uppbyggnad

Sprängämnet skall ha hög densitet, högt energiinnehåll och hög detonationshastighet, d.v.s. vara ett så kallat högbrisant sprängämne. Genom dessa egenskaper får det stor förmåga att accelerera metallinlägget som senare ska bilda strålen. Laddningarna framställs genom gjutning eller pressning och avancerad tillverkningsteknik krävs för att tillräcklig homogenitet skall erhållas. Vanliga typer av sprängämnen är oktöl för gjutning och plastbunden oktogen (PBX) för pressning (se kapitel 2.3).

Utvecklingen på sprängämnessidan går mot ökat energiinnehåll och högre detonationshastighet samt mot större okänslighet för ofrivillig initiering (IM – Insensitive Munition).

Inläggets form och tjocklek är väsentliga för strålegenskaperna. Den enklaste och fortfarande vanligaste inläggsformen är den räta konen, ofta med en öppningsvinkel på ca 40 grader. Trots många försök att få bättre strålegenskaper än den som vanliga, räta koner kan ge, har dessa ofta visat sig vara svåröverträffade. I vissa fall är det dock befogat med annan form på inlägget.

Trumpetformade inlägg används för att öka spetshastigheten relativt strålens bakre delar. Genom detta töjs strålens främre del snabbt och penetrationen blir god även vid små detonationsavstånd. Detta utnyttjas ofta i förpenetratorer. Trumpetformade inlägg påverkas även mindre av negativa hastighetsgradienter, d.v.s. man får inte det stora första-fragmentet som bildas vid användning av räta koner.

Laddningar med tulpanliknande inlägg kan göras kompakta och är avsedda att ge strålar med mindre massa i sluggen och lägre hastighetsgradient. Då konvinkeln minskar mot laddningens bas bör detta enligt strålbildningsteo-

rin kompensera för den lägre utkastningshastighet som fås p.g.a. den mindre mängden sprängämne där. Resultatet blir att de bakre delarna av strålen får en högre hastighet jämfört med om inlägget var en kon. Även hemisfäriska inlägg ger upphov till liknande strålegenskaper men strålbildningen sker med en något annorlunda kollapsmekanism.



Figur 3.21. Trumpet resp. tulpanformat inlägg. (Källa: FOI)

Det ställs extremt höga krav på inläggets rotationssymmetri om strålegenskaperna ska bli goda, tillåtna tjockleksvariationer är av storleksordning mikrometer i ett snitt tvärs inläggsaxeln.

Inläggs materialet måste vara sådant att det har mycket goda töjningsegenskaper vid de förhållanden som råder vid RSV-strålbildning. Materialet stötvågsbelastas när sprängämnet detonerar, vilket normalt innebär ett kraftigt deformationshårdnande. Därefter deformeras materialet kraftigt på mycket kort tid, vilket tillsammans med stötvågsbelastningen ger en kraftig temperaturhöjning, upp till 500°C. Sedan töjs det mycket kraftigt (i genomsnitt upp till 10 gånger) och med hög töjningshastighet (storleksordningen 10^6 och mer). Allt detta innebär att materialet befinner sig i ett tillstånd långt ifrån det som råder vid vanliga belastningar. Det är oklart vilka av materialets vanliga hållfasthetsegenskaper som är användbara för att avgöra om ett material är lämpligt till RSV-inlägg. Hög duktilitet är dock en viktig egenskap. Försök har även visat att en finkornig struktur utan föroreningar är en viktig förutsättning för bra RSV-strålar.

När strålen fragmenterar är det viktigt att det sker på ett sådant sätt att fragmenten, förutom att strålen givetvis måste vara rak, inte utsätts för snedkrafter som får strålfragment att tumla. Detta innebär att materialet skall vara sådant att avsnörningsbrott och inte skjuvbrott uppstår. Andra önskvärda material-egenskaper är hög smälttemperatur (då man vill ha en fast metallstråle) och hög ljudhastighet (som medger en hög spetsastighet).

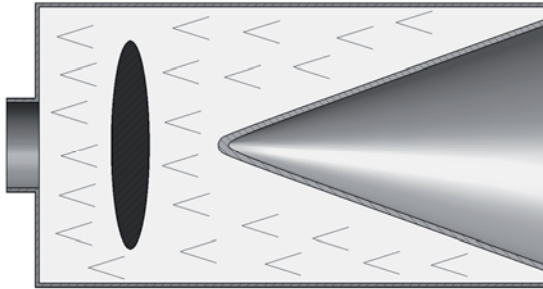
Koppar är för närvarande det helt dominerande materialet i RSV-inlägg. Det har mycket god duktilitet samt relativt hög täthet ($8\,900\text{ kg/m}^3$), smälttemperatur ($1\,100^\circ\text{C}$) och bulk-ljudhastighet ($3\,900\text{ m/s}$). Även andra material än koppar studeras. Som exempel kan nämnas tantal, molybden, silver, tungmetall (oftast volfram-koppar) och uran.

Ett flertal olika framställningsmetoder som ger homogena, finkorniga, inneslutningsfria och texturfria alternativt ”textursymmetriska” inlägg finns. Som exempel kan nämnas kall- alternativt varmpressning, trycksvarvning, svarvning ur bult, het-isostatisk pressning (HIP) av pulver samt höghastighetsformning.

Eftersom strålen bildas av material från inläggets insida och sluggen av material från dess utsida kan man tänka sig att använda olika material på in- respektive utsidan. Denna typ av inlägg brukar kallas bimetallinlägg. Då den bakre delen av strålen huvudsakligen bildas av material från inläggets bas kan man utföra denna del i något pyrofort material som exempelvis aluminium medan resten av inlägget görs av ett material med goda penetrationsegenskaper. Den främre delen av strålen gör hål i pansaret och den bakre ger restverkan inne i målet.

Initieringsanordningen har stor betydelse för laddningens prestanda. Den måste utföras så att den ger en perfekt centrerad detonation med tillräcklig styrka. Ett flertal olika utföranden finns. Utmärkande för ett bra utförande är att det riktar upp detonationsvågen så att denna träffar huvudladdningen symmetriskt.

Laddningar kan förses med en vågformare, t.ex. en inert kropp som har till uppgift att rikta om detonationsfronten så att denna träffar inlägget vinkelrätt i stället för strykande. Detta kallas för randinitiering och gör att energiöverföringen från sprängämne till inlägg förbättras och att kollapshastigheten ökar. Randinitiering har kunnat öka spets hastigheten med 2 000 m/s med bibehållen hastighetsgradient.



Figur 3.22. Laddning med vågformare. (Källa: FOI)

För praktiskt militärt bruk måste RSV-laddningarna utformas så att de tål utskjutningspåkänningarna. Detta innebär att de måste förses med ett hölje som särskilt för eldrörsutskjutna laddningar kan bli ganska tjockt.

Då laddningen förses med ett metallhölje kommer detta att förhindra spränggasernas radiella expansion och ge en stötvågsreflektion mot ytterhöljet. Detta gör att utkastningshastigheten för de olika elementen i metallinlägget

ökar relativt fallet ofördämd laddning. Hur stor denna inverkan blir beror av inläggets geometri och höljets tjocklek.

Ett annat konstruktivt problem i samband med utskjutning av RSV-laddningen är att den måste stabiliseras i sin bana. Denna stabilisering görs i vissa fall genom att stridsdelen ges en rotation. Detta är dock olämpligt eftersom strålbildningen störs så att den bildade strålen splittras radiellt vid rotationen. Detta problem uppstår inte vid fenstabiliserade stridsdelar. Dessa kan förses med slirande gördel om de ska skjutas ut ur räfflade eldrör. Ett annat sätt att undvika den negativa effekten av rotation är att använda speciella inlägg som kompenserar rotationen, t.ex. via sin textur.

- Penetrationsegenskaper för RSV-strålar

Den höga hastigheten på RSV-strålen gör att det tryck som uppstår mellan stråle och pansar blir mycket högre än materialens hållfasthet. Man kan då i en första approximation bortse från hållfasthetskrafterna och beskriva penetrationsprocessen som att strålen och målet uppför sig som vätskor (ett hydrodynamiskt förlopp). Enbart tröghetskrafterna, d.v.s. strålens och målets densitet, inverkar. Materialet i strålspetsen kastas ut åt sidorna tillsammans med det mål-material som är i kontakt med strålen. Strålen konsumeras under inträngningen och inträngningsdjupet beror direkt av strålens längd.

Penetrationsförmågan P för en RSV-stråle beräknas förenklat med nedanstående formel

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_{\text{stråle}}}{\rho_{\text{mål}}}}$$

där L är strålens längd och $\rho_{\text{stråle}}$ och $\rho_{\text{mål}}$ är strålens respektive målets densitet.

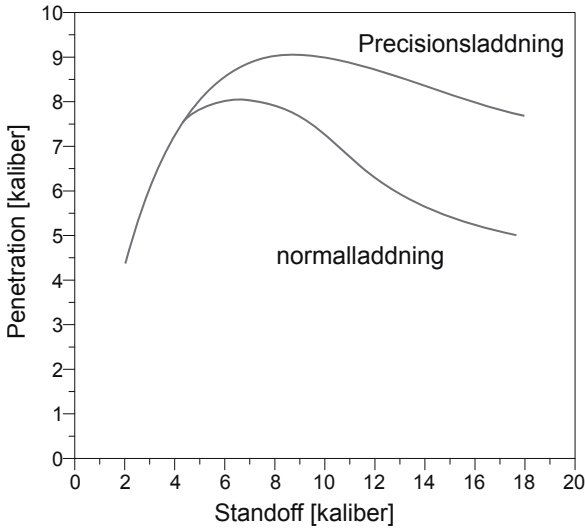
Verkliga RSV-strålars penetrationsförmåga beror också av andra parametrar: strålens raket, mass- och hastighetsfördelning, ofragmenterad eller fragmenterad stråle, fragmentens form, snedställning och inbördes lägen samt av målmaterialiet.

Tidigare har konstaterats att en RSV-ståle till en början är kontinuerlig för att senare fragmentera i ett stort antal fragment. Optimal genomslagsförmåga erhålls precis då strålen börjar fragmentera. Då har nämligen strålen fått sin maximala längd, och genomslagsförmågan bestäms av den sammanlagda strållängden enligt den hydrodynamiska teorin ovan.

Efter fragmentering blir fragmentens sammanlagda längd konstant, medan avståndet mellan fragmenten hela tiden ökar. Då strålen aldrig är riktigt rak

ökar avståndet från symmetriaxeln med gångvägen eftersom varje strålfragment går sin egen rätlinjiga bana. Detta innebär att fragment kan stöta emot hålvägen eller missa hålet helt varvid inträngningsförmågan försämras.

Diagram som visar en RSV-laddnings penetrationsförmåga som funktion av detonationsavståndet till målet brukar kallas laddningens stand-off-kurva. Två exempel på sådana kurvor framgår av *Figur 3.23*. För en ideal stråle sjunker inte penetrationsförmågan då strålen fragmenterar och en rak stråle ger en flackare stand-off-kurva än en sned stråle.



Figur 3.23. Penetrationsförmågan som funktion av stand-off. (Källa: FOI)

Det finns en lägsta hastighet där strålen inte längre bidrar till penetrationen i homogena mål (kallad undre gränshastigheten). För att strålen ostört ska kunna bidra till penetrationen måste hålvolymin vara minst dubbelt så stor som strålvolymin (för att strålen ska "få plats att flyta undan"). I verkligheten krävs att strålvolymin är ca 1/4 till 1/6 av hålvolymin för att detta ska inträffa. Den undre gränshastigheten beror både på laddningen och på målet. För homogena pansarstålsmål är den av storleksordningen 3 500-5 000 m/s. Ju hårdare och därmed mer svårdeformerat målmaterial är desto mindre blir håldiametern och desto högre blir gränshastigheten. Målets hållfasthet har alltså indirekt en påverkan på penetrationen. Fragment med hastigheter över den undre gränshastigheten utgör den "effektiva strållängd" som ger inträngningsförmågan i homogena mål.

Ett fenomen som bidrar till att minska penetrationsförmågan för en fragmenterad stråle är så kallade "tillslutningar" (engelskans "closures"). Detta be-

ror på att då strålen möter målmaterialet plasticeras detta och flyter åt sidan tillsammans med strålmaterialet. Strålen pressar ut målmaterialet radiellt, äts upp framifrån, och strömmar ut längs randen av det bildade hålet.

Projektil- och målmateriäl från de enskilda fragmenten kan strömma tillbaka och sluta till hålskanalen (closure-effekten). Efterföljande fragment får då arbeta sig igenom dessa material innan det kan arbeta i den egentliga hålbotten. Målet kan sägas ha en viss självläkning. Dessa slutningseffekter upprepas successivt för varje nytt fragment.

Ett annat fenomen som kan uppstå i spröda material som keramer är att delar av hålväggen kan kastas in i penetrationskanalen och störa RSV-fragmenten.

Det är alltså viktigt att det uppkomna hålets diameter är tillräckligt stort, eftersom ett stort hål underlättar för efterkommande fragment att nå ner till hålbotten. För att åstadkomma detta krävs att strålen har stor rörelseenergi per längdenhet d.v.s. hög hastighet och densitet.

Sammanfattningsvis kan sägas att för att få stor inträngning från en RSV-laddning är det viktigt att strålen har stor verksam längd, att strålen är rak och att fragmenten inte är snedställda.

Ett enkelt sätt att öka penetrationsförmågan hos en RSV-stridsdel är att öka kalibern på laddningen. Denna möjlighet begränsas dock av det förhållande att genomslagsförmågan endast ökar proportionellt mot kalibern (längdskalan) medan laddningens volym och därmed vikt ökar med kalibern i kubik. Man är därför normalt begränsad till en given maximal diameter och får i stället förbättra laddningen på andra sätt.

Det kan dessutom påpekas att strålens spets hastighet (som är den högsta hastigheten), kan maximalt nå ett visst värde som beror på materialet i strålen och inläggets geometri. Om spets hastigheten överskrider materialets gränshastighet får man en svärm av små partiklar i stället för sammanhållna fragment.

- Verkan efter penetration

Kriteriet på en bra stridsdel är att den gör så stor verkan i målet som möjligt. Verkan erhålls i första hand genom att målet penetreras och bakre delen av strålen kommer in i målet och slår ut vitaldelar som är i strålens väg.

Det är därför viktigt att laddningen dimensioneras så att den har tillräcklig restpenetration kvar efter att den har slagit igenom skyddet (pansaret). Hur mycket restpenetration som krävs är givetvis starkt beroende av vilket mål som bekämpas och var i målet laddningen träffar men ett typiskt värde kan vara motsvarande 50 till 100 mm stål. Det räcker således inte att bara nått och jämnt slå igenom pansaret.

Vid genomslaget erhålls dessutom sekundärsplitterutkast, brand, tryck, ljusfenomen samt rök- och gasutveckling.

De sekundärsplitter som kastas ut från baksidan av pansaret när strålen penetrerar är färre och har mindre genomslagsförmåga än de som uppstår vid projektilpenetration. De kan delvis elimineras genom att pansaret kläs på insidan med så kallade ”spall liners” av fiberkomposit.

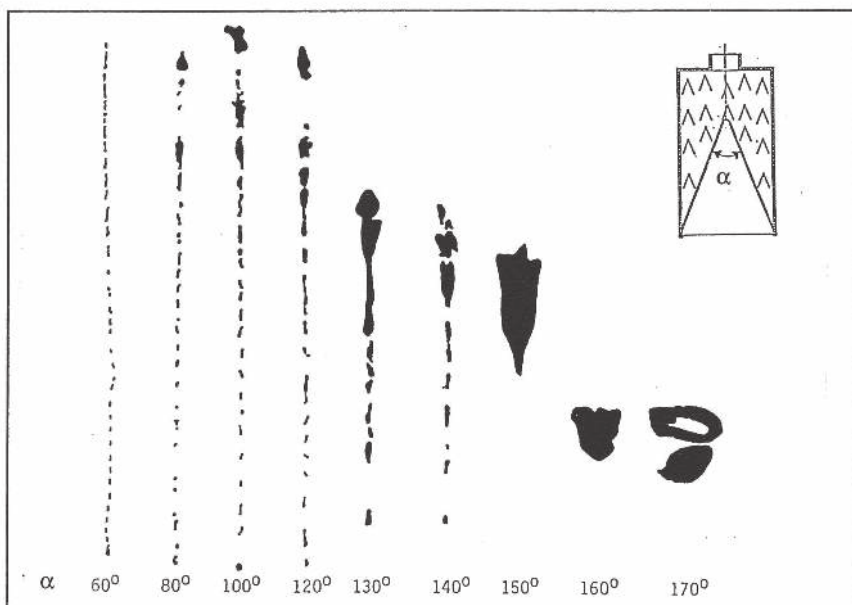
Strålen som kommer in i vagnen kan sätta eld på bränsle, ammunition eller andra brännbara komponenter då den penetrerar dessa (deformationsvärme). För att förstärka denna effekt förses vissa RSV-stridsdelar med koner av material som är pyrofora, t.ex. aluminium, uran eller zirkonium. Trycket som vanliga RSV-laddningar ger bidrar inte nämnvärt till verkan i ett stridsfordon. Pyrofora konmaterial kan dock ge tryckökningar som kan skada besättningens öron eller lungor.

En RSV-laddning ger dessutom upphov till ljusfenomen som kan blända besättningen samt giftiga gaser (främst kväveoxider och kolmonoxid), rök och sot. Dessa effekter, tillsammans med de psykologiska effekterna av att vagnen träffas, är svåra att värdera verkansmässigt.

3.3.2 Projektilbildande RSV-stridsdelar

Projektilbildande RSV bildar en penetrator som är en mer eller mindre sammanhållen projektil i stället för en långt utdragen stråle. Utkastningshastigheten för projektilen ligger normalt runt 2 000-3 000 m/s. Stridsdelstypen kallas också RSV-4 eller på engelska ”Explosively Formed Projectile” EFP.

Projektilens utseende beror främst av inläggets geometri. För att få en sammanhållen projektil används inlägg med stor konvinkel (d.v.s. flata inlägg). Har konen däremot en liten konvinkel (d.v.s. spetsiga inlägg) fås en stråle. Detta illustreras i *Figur 3.24*, där man systematiskt varierat konvinkeln från 170 till 60 grader. Av *Figur 3.24*, framgår också att mellanformer mellan sammanhållna projektiler och utdragna strålar förekommer.



Figur 3.24. Strålförlopp/projektilform som funktion av konens toppvinkel. (Källa: FOI)

Förutom konvinkel inverkar inläggets tjocklek, höljet och mängden sprängämne på projektilens form.

Projektilbildande RSV-laddningar har väsentligt mindre genomslagsförmåga än strålbildande RSV-laddningar på korta detonationsavstånd. Däremot är genomslagsförmågan på stora avstånd från laddningen mycket bättre. Detta beror på att en långsammare och större sammanhållen projektil har en ganska måttlig luftbromsning varför genomslaget huvudsakligen beror av projektilens attityd när den träffar målet; de små fragmenten i en RSV-stråle bromsas (och eroderas) ordentligt efter en längre gångväg i luft och kommer dessutom på grund av de snedheter som alltid finns i strålen att träffa i olika punkter i målet.

Två olika huvudvarianter av projektilbildande RSV-laddningar förekommer: I den ena varianten fås en kompakt ”kulformig” projektil. Denna har ett genomslag på maximalt ca 0,5 laddningskalibrer. Fördelen med denna typ är att genomslagsförmågan blir relativt oberoende av projektilens attityd vilket minskar precisionskraven på laddningen.

I den andra varianten fås en mer utdragen projektil. Man önskar efterlikna en vanlig pansarbrytande projektil. Man har uppnått genomslag på över en kaliber med denna stridsdelstyp. Projektilen får inte komma snett då den träffar målet varför den måste vara aerodynamiskt stabil. Detta ställer stora krav på symmetrin hos verkansdelen, väl i klass med dem som gäller för strålbildande RSV-stridsdelar.

Inlägget var tidigare vanligen av koppar eller rent järn men på senare år har även tantal börjat användas. Även silver, tungmetall eller uran kan användas. I vissa mintillämpningar används aluminium, men då fås ofta en koncentrerad splittersvärm snarare än en sammanhållen projektil. Aluminium ger en tryckstegring då fragmenten förbränns.

En projektilbildande RSV-laddning ger ett mycket större hål än en strålbildande RSV-laddning varför verkan efter genomslag normalt blir större. Detta gäller särskilt för bottenverkande RSV-4-minor där de tryck som uppstår i vagnen kan bli sådana att vagnen slås ut.

3.3.3 Tandemstridsdelar

Med en tandemstridsdel menas, i dag oftast, en stridsdel där verkansdelen består av två eller flera RSV-laddningar efter varandra.

Den vanligaste typen av tandemstridsdel är den som är avsedd att klara reaktivt pansar. Här ligger stridsdelarna centrerade på ett visst avstånd efter varandra. I denna tillämpning låter man en vanligtvis liten RSV-laddning (kallad förpenetratorn) först initiera det reaktiva pansaret varefter den andra större laddningen (kallad huvudladdningen) initieras efter en tidsfördröjning som är tillräckligt stor för att det reaktiva pansaret skall ha slutat verka. Huvudladdningen kan då ostörd penetrera huvudpansaret, se *Figur 3.25*.

Det går att göra enkla överslag för att beräkna de separationsavstånd och de tidsfördröjningar som behövs mellan laddningarna för att tandemladdningen skall fungera effektivt om man känner till det reaktiva pansarets uppbyggnad. Då laddningen måste kunna verka mot ett flertal olika pansartyper är det ofta svårt att komma fram till en lämplig kompromisslösning som klarar detta.

Omvänt är det så att om man känner till detaljerna om hur en tandemstridsdel är uppbyggd och fungerar kan det vara möjligt att utforma ett reaktivt pansar som klarar denna laddning. Sekretessen kring operativa tandemstridsdelar och reaktivt pansar är därför stor.

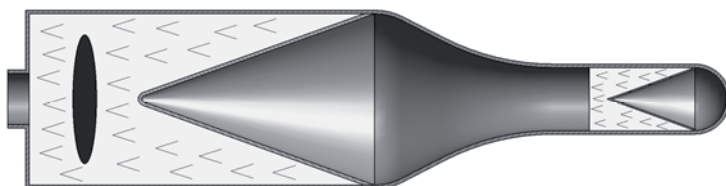
Ett problem med tandemladdningar är att den första laddningen kan (för) störa den andra när den detonerar. Ett annat problem är att sluggen från den första laddningen kommer i vägen för spetsen av den andra laddningen. Ett flertal lösningar på dessa konstruktiva problem finns och s.k. slugglösa har laddningar tagits fram.

Om man kan få två likadana laddningar att verka i samma hål skulle man i princip få dubbelt så stor penetrationsförmåga som från en laddning. Tandemladdningen skulle då väga dubbelt så mycket som enkelladdningen. Om man istället försöker fördubbla genomslagsförmågan genom att skala upp laddningen till dubbla diametern skulle vikten på denna laddning bli 8 gånger större än för ursprungsladdningen eftersom massan ökar med kuben på längdskalan.

Det stora problemet med denna typ av tandemladdning är de extrema precisionskrav som måste uppfyllas.

Stridsdelar med trippelladdningar finns och projekt med kvadruppelladdningar studeras.

Begreppet tandemstridsdel används i en del sammanhang även för att allmänt beteckna stridsdelar som innehåller mer än två verkansdelar. Vi väljer att kalla denna typ av verkansdel flerfunktionsstridsdel och förbehåller termen tandemstridsdel för stridsdelar som består av en förpenetrator och en efterföljande huvudladdning, se även avsnitt 4.1.4.



Figur 3.25. Exempel på tandemladdning. (Källa: FOI)

3.3.4 Övriga RSV-stridsdelar

För att en strålbildande RSV-stridsdel skall ha maximal verkan skall strålen hela tiden verka i botten på det hål som påbörjats vilket innebär att stridsdelen skall ha hastighetsvektorn och symmetriaxeln sammanfallande. Dock har det tagits fram strålbildande RSV-stridsdelar som ”flyger” mer eller mindre vinkelrät mot laddningens symmetriaxel s.k. ”overflying top attack”. Dessa får god verkan genom att man lyckas kompensera för strålens sidhastighet.

Genom att använda fler initieringspunkter kan man åstadkomma att strålen får annan form än en ”rak cylindrisk stråle” eller att den delas upp i fler strålar eller fragment, något som kan vara av intresse vid konstruktion av s.k. adaptiva stridsdelar där verkansformen kan varieras (jmf. avsnitt 4.4 och 9.1)¹³.

13. FOA-RH--99-00473-310, ”Adaptiva stridsdelar med flermålskapacitet för olika vapensystem”.

4. Övriga konventionella stridsdelar och deras verkansformer

4.1 Tryckverkande stridsdelar

Stridsdelar som innehåller sprängmedel ger vanligen tryckverkan. Tryckverkan kan vara i form av sprängverkan i närheten av laddningen eller stötvågor i luft, i mark eller i vatten på kortare eller längre avstånd. Exempel på tryckverkande stridsdelar är minor. Minor kan ha stor sprängkraft i närzonen och ge upphov till svåra skador.

Granater och artilleriprojektiler innehåller också ofta sprängmedel. Deras huvudsakliga verkan är dock genom splinter.

Bomber kan ge tryckverkan även på större avstånd. Bomber är flygburna. Kryssningsmissiler innehåller ofta stora mängder sprängmedel.

Exempel på flygbomber utgör Mark 80 serien i USA. Den omfattar Mk81 (113 kg), Mk82 (227 kg), Mk83 (454 kg) och Mk84 (908 kg). Ungefär hälften av totalvikten utgörs av sprängmedel.

S.k. IED (Improvised Explosive Device) förekommer i terroristsammanhang. Vid sprängningen vid Khobar Tower i Saudi Arabien 1996 var laddningen cirka 10 ton. Antalet dödsoffer var 19 och antalet skadade 372. Vid sprängningen i Oklahoma city var laddningen cirka 1,5 ton. Här dödades 168 människor. De stora förlusterna i människoliv var dels på grund av direkt verkan av luftstötvågor och av splinter - främst glassplinter - och andra byggnadsskador. Bilbomber är exempel på IED. De ger, utöver luftstötvågsverkan, även splintereffekter.



Figur 4.1. Skador av tryckvågen vid bombningen av Khobar Tower den 25:e juni, 1996. (Foto: US Air Force, i public domain)

4.1.1 Tryckverkan

När sprängämnet i en stridsdel detonerar övergår det snabbt i gasform och utvecklar ett mycket högt tryck som sprider sig ut från detonationspunkten. Området närmast laddningen expanderar – också mycket snabbt. I den omkringliggande luften bildas en luftstötvgång, som breder ut sig från explosionscentrum. Utbredningshastigheten är till en början hög – flera km/s. Vartefter stötvågen breder ut sig avtar dess energi genom värmeförluster till omgivningen. Trycket blir lägre, varaktigheten ökar och hastigheten avtar för att så småningom nå ner till ljudhastigheten, cirka 340 m/s.

Trycket mot t.ex. en tryckgivare är, innan trycket från detonationen hunnit fram till givaren, lika med atmosfärstrycket (P_0). När stötvågen når mätaren, efter tiden, t_a , ökar trycket mycket snabbt till topptrycket P_s . Trycket avtar sedan med tiden och faller efter tiden t_d ner till det ursprungliga. Tiden t_d kallas för (den positiva) varaktigheten.

För beräkning av trycket och hur det ändras med tiden använder man ofta ett förenklat samband, den så kallade. "Friedlander-ekvationen":

$$P(t) = P_s \cdot \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \cdot e^{-\left(\alpha \frac{t}{t_d}\right)}$$

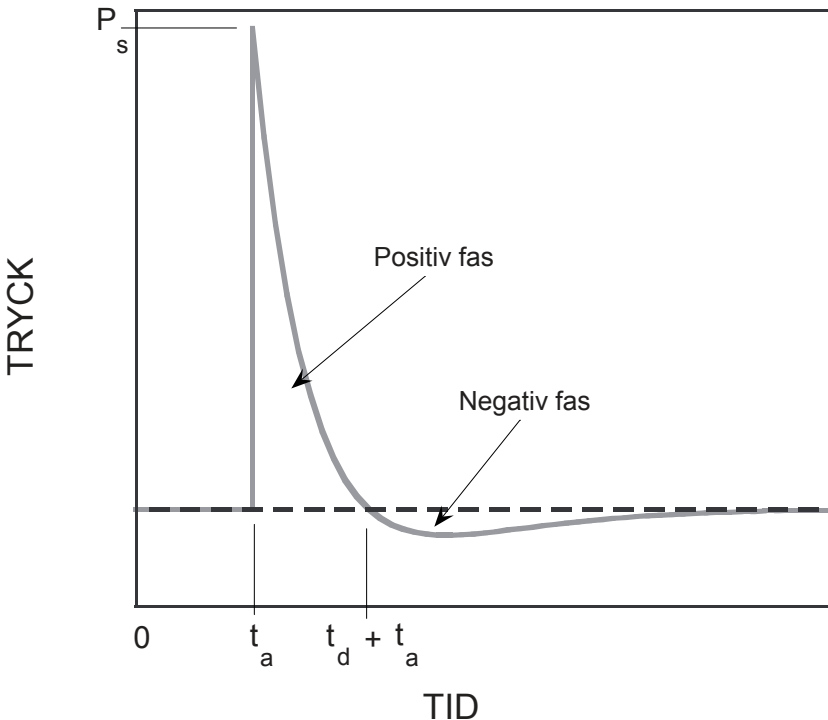
Med "Friedlander-ekvationen" kan man beräkna trycket vid tiden t , $P(t)$, där P_0 är omgivningens tryck, t_d , övertryckets varaktighet och α en konstant som anger hur snabbt tryckavtagandet sker.

Luftstötvågen karaktäriseras bl. a. av tryck, p , och impulstäthet, i . Med impuls menar man ändring i rörelsemängd, mv , (massan gånger hastigheten). Impulsen kan också uttryckas (med utgångspunkt i Newtons andra lag¹⁴) som en integral av kraft under verkanstiden.

I stötvågssammanhang talar man ofta om impuls då man egentligen menar impulstäthet dvs. impuls per ytenhet. Impulstätheten kan uttryckas som ytan under belastningens tryck-tid-kurva.

För små laddningar är varaktigheten delar av millisekunder eller enstaka millisekunder. För större bomber varar övertrycket några till något tiotal millisekunder. Trycket från kärnladdningar kan verka under delar av eller, för extremt stora kärnladdningar ("Megatonladdningar"), t.o.m. flera sekunder.

Efter övertrycket bilads ett undertryck. Undertrycket är mindre än övertrycket men har längre varaktighet. Normalt behöver man inte bry sig om detta undertryck när man studerar verkan av luftstötvågor mot konstruktioner.



Figur 4.2. Idealiserad luftstötvåg. (Illustration: Samuel Svärd)

14. Se även LIM 1, Lärobok i Militärteknik Vol. 1. Grunder kapitlet Mekanik.

Stötvågen från en detonation i fri luft rör sig från laddningen mot föremål i dess väg. Då stötvågen når ett sådant föremål kan trycket öka genom reflexion.

Om stötvågen faller in vinkelrätt mot hindret uppstår normalreflektion. En normalreflektion medför en fördubbling av trycket vid låga tryck. Vid högre trycknivåer kan trycket bli en faktor cirka åtta gånger så stort som det ursprungliga (och vid riktigt höga tryck, dvs. nära laddningens yta, så mycket som upp till 20 gånger högre).

Mot en yta, som är parallell med utbredningsriktningen, får man ett s.k. side-on-tryck. Side-on trycket är lika stort som trycket i den ostörda vågen.

Om detonationen sker nära marken eller direkt på marken kommer stötvågen från laddningen att förstärkas på grund av markreflexion. En laddning, som detonerar ovanför marken på avstånd från ett objekt så, att stötvågen reflekteras mot marken innan stötvågen når objektet kommer den direkta och den reflekterade stötvågorna att samverka och förstärka varandra. Man får en så kallad Machvåg.

När man beräknar trycket från en laddning på marken kan man ta hänsyn till den s.k. speglingseffekten genom att man beräknar trycket från en laddning dubbelt så stor som den verkliga.

Trycket från en våg som breder ut sig i terrängen påverkas av hinder. Sådana hinder kan vara byggnader, fordon eller annat i dess väg men också exempelvis lutningar och dalgångar. Generellt kommer trycket att öka när vågen möter ett uppförslut eller går in i en förskärning. På motsatt sätt kommer trycket att minska vid ett nedförslut.

4.1.2 TNT-ekvivalent

Massan av ett explosivämne med motsvarande verkan som ett kg TNT brukar anges som ämnets TNT-ekvivalent. Verkan kan avse olika storheter, vanligen tryck eller impuls. Beroende på vilken storhet som jämförs fås olika värden på TNT-ekvivalenten.

För att få användbara värden på TNT-ekvivalenten måste laddningsform, testförhållanden (atmosfärstryck, temperatur) vara enhetliga.

4.1.3 Tryck från vapen

Vid laboratorieförsök kan man ofta med fördel använda sfäriska laddningar. De flesta laddningar som används i vapen är dock vanligtvis inte sfäriska. Stötvågorna från laddningen blir då inte heller sfäriska.

Luftstötvågen blir beroende av laddningens form och var initieringen av laddningen sker liksom av laddningens orientering i förhållande till objektet.

Inverkan av laddningens form på trycket är störst närmast laddningen och minskar med ökande avstånd.

I ammunition är laddningen omgiven av ett hölje. Ett kraftigt hölje absorberar mer energi då det bryts sönder än ett tunt vilket leder till lägre stötvågstryck. Omvänt gäller för en innesluten laddning, att höljet hindrar sprängmedlet från att stötas ut vid detonationen vilket leder till ett förhöjt tryck. Då dessa effekter kan ta ut varandra använts ofta den verkliga laddningsstorleken vid beräkning av stötvågstryck utan korrigering för höljets inverkan.

Höljet kan ha olika tjocklek i olika punkter. Trycket från en detonation kommer att bli olika i olika riktningar och beräkningen av trycket kan bli mer komplicerad.

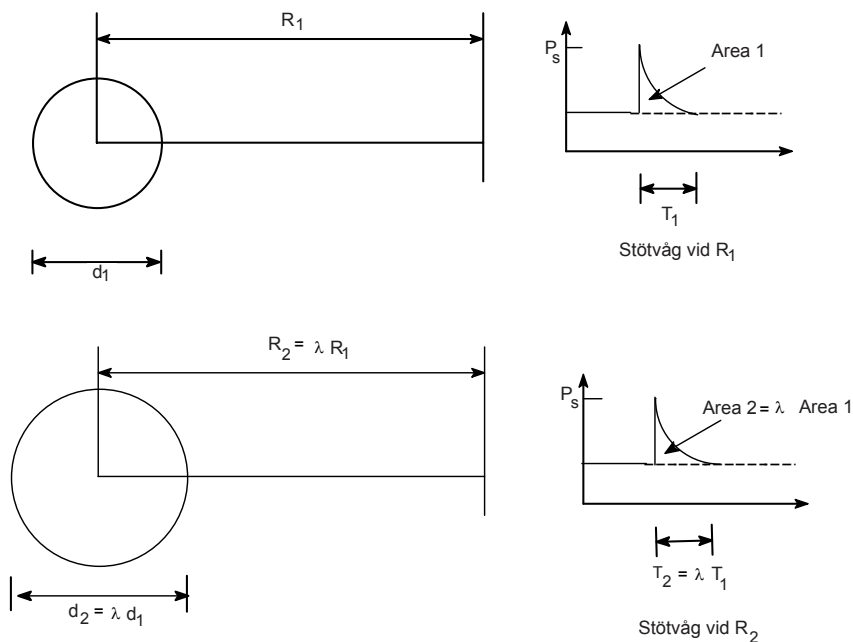
Förenklade antaganden måste ofta användas. Utöver impulsen från luftstöt-vågen kan impulslaster (impuls, se ovan) uppkomma av splitter som träffar ett föremål. Detta måste ur skyddssynpunkt därför utformas för att skydda både mot impulsen från luftstöt-våg och från splitter.

Impulserna från luftstöt-våg och från splitter når inte alltid fram samtidigt utan kommer efter varandra. Föremålet kan därför ha skadats av den ena effekten då den andra når fram.

4.1.4 *Skallagar*

Den vanligen använda skallagen vid luftstöt-vågsberäkningar är den s.k. Hopkinson-Cranz skallag, ofta kallad "tredjerotenskalning".

Enligt Hopkinson-Cranz skallag gäller, att stötvågor med samma tryck genereras på samma skalade avstånd när laddningar av samma ämne och med samma form men med olika massa detonerar.



Figur 4.3. Hopkinson-Cranz skalleg. (Källa: Från NATO AC/326 AASTP-4 Part II Change 1, 2008)

Mer allmänt gäller:

$$R_1/R_2 = (Q_1/Q_2)^{1/3}$$

där R_1 är det avstånd vid vilket ett visst övertryck skapas av en laddning med massan Q_1 och R_2 är det avstånd vid vilket samma övertryck skapas av en laddning med massan Q_2 .

Ett praktiskt sätt är att ange tryck som funktion av skalat avstånd, $r = R/Q^{1/3}$ ($m/kg^{1/3}$), se *Figur 4.3*. På mycket korta avstånd (då r är mindre än 0.2) kan stötvågens tryck överstiga 10 MPa. Stötvågens tryck sjunker mycket snabbt med ökande avstånd och minskar till ca 1 % då $r=200$.

På liknande sätt kan man visa funktioner för impuls(täthet). Impulserna blir då också skalade. Impulsen fås som den skalade impulsen multiplicerad med skalfaktorn, $Q^{1/3}$.

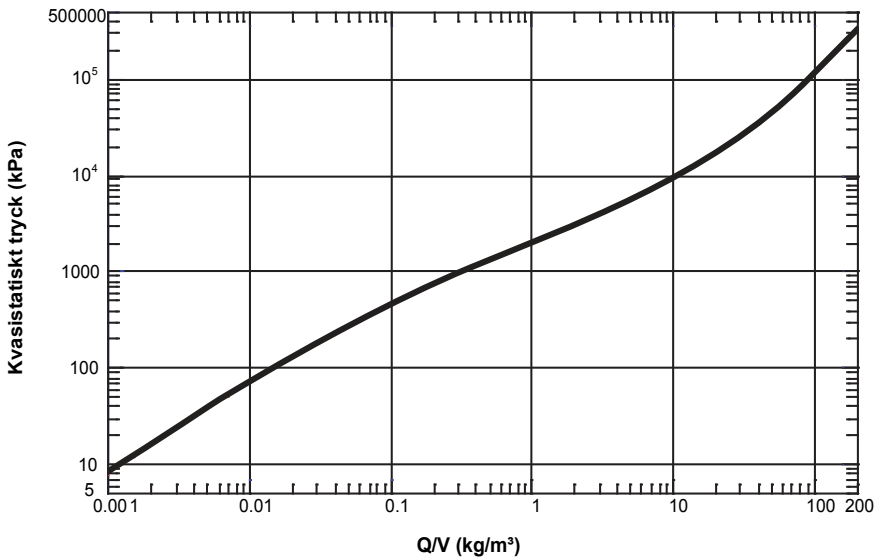
För att få samma övertryck på ett dubbelt så stort avstånd krävs en 8 ($=2 \cdot 2 \cdot 2$) gånger så stor laddning. Impulsen blir samtidigt dubbelt så stor.

Vid beräkning av tryck från laddningar på marken används ofta dubbla laddningsvikten p.g.a. spegling, se avsnitt 4.1.1.

4.1.5 Inneslutna laddningar

Om detonationer sker i slutna utrymmen kommer stötvågorna att reflekteras mot angränsande väggar vända åter och sedan reflekteras mot en annan vägg, återreflekteras ånyo, etc. Detta leder dels till höga tryck, dels till långa varaktigheter. En laddning inuti en byggnad kan därför i många fall åstadkomma väsentligt större skada än en motsvarande laddning utanför byggnaden. Jämför också vad som sägs i avsnitt 10.3 om bakblåsningvapen i slutna rum. Även för dessa förklaras den större verkan i det slutna utrymmet med tryckreflexioner.

(Det långvariga) tryckets storlek beror av laddningens storlek och volymen av det slutna utrymmet, man talar om laddningstätheten, Q/V (kg/m^3). Trycket som brukar kallas gastrycket eller kvasistatiskt tryck som funktion av laddningstätheten kan beräknas med hjälp av *Figur 4.4*. Som jämförelse kan nämnas, att bjälklagen i vanliga byggnader görs för att klara laster om ett par kN/m^2 (kPa).



Figur 4.4. Kvasistatiskt tryck i slutet utrymme (baserat på TNT) (Källa: Från NATO AC/326 AASTP-4 Part II Change 1, 2008)

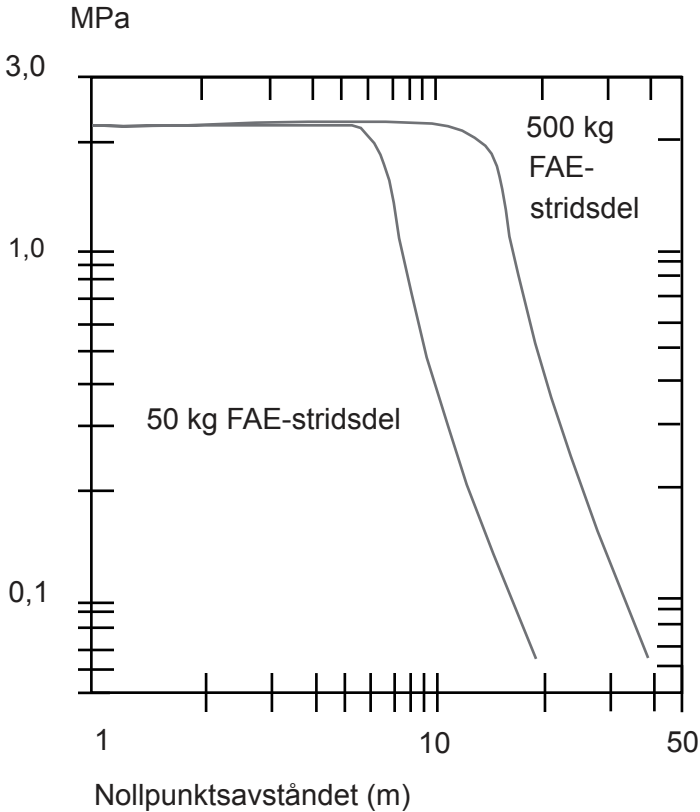
4.1.6 Inläckning

Byggnader och fordon kan utformas för att ge skydd mot luftstöt vågor. Det är viktigt, att detta skydd görs heltäckande. Även mindre öppningar för luftintag, fönster m.m. kan ge luftstöt vågor tillträde in i skyddet. Dels kan skador uppkomma vid och bakom håligheten där trycket strömmar in, dels kan ett långvarigt yttre tryck leda till att ett tryck byggs upp inuti skyddet.

4.1.7 Termobariska laddningar och FAE

Termobariska laddningar (Enhanced Blast är den engelska beteckningen som mer och mer börjar användas) är en typ av stridsdel som ger stor verkan i slutna rum. Termo står för värme och barisk står för tryck. Dessa kastar ut sprängämne från stridsdelen varvid det bildas en eldkula och en tryckvåg som har relativt lång varaktighet. Lång varaktighet uppnås t.ex. genom att stridsdelen innehåller metallpulver som förbrinner med luftens syre. Elden skadar exponerad hud och ögon men de värsta skadorna orsakas av tryckvågen som ger inre skador på vitala organ. Att också trycket hålls uppe under relativt lång tid gör att man får en hög impuls som "hinner" trycka ut väggar och motsv. men också att större mängder värme hinner överföras. En del av de termobariska vapnen har tandemladdningar som består av en RSV-stridsdel för genomslag av målet följt av en termobarisk laddning, se även avsnitt 4.3.2. Denna stridsdelstyp utvecklades först i Sovjetunionen under kriget mot Afghanistan där den användes för bekämpning av trupp gömda i grottor. Även under striderna i Tjetjeniens huvudstad Groznyj användes vapentypen i stor utsträckning. Termobariska vapen utvecklas och produceras nu även i väst.

Luftstöt vågsverkan av termobariska laddningar och FAE, Fuel Air Explosives, explosiva gasmolnblandningar, är likartad den från konventionella sprängmedel. I termobariska laddningar eftersträvar man den förlängda reaktionstiden med förhöjd verkan – särskilt i slutna utrymmen. Trycket från en FAE – laddning är konstant och högt (2-3 MPa) i gasmolnet och avtar snabbt med ökande avstånd till molnet, se *Figur 4.5*.



Figur 4.5. Luftstöttsågverkan från FAE-laddning. (Källa: Forth 2, 1991, M7747-707122)

För luftstöttsåg från kärnvapen där luftstöttsågen har lång varaktighet kan speciella skyddsinsatser krävas.

4.1.8 Verkan av luftstöttsåg

Verkan mot en konstruktion på grund av en explosion kan ske i form av luftstöttsåg, splitserverkan och markstötksåg.

Luftstöttsåg påverkas av föremål i dess väg. Samtidigt kan föremål som träffas av en luftstötksåg förändras, förstöras eller förflyttas vilket i sin tur ytterligare påverkar stötksågen.

De viktigaste faktorer som bestämmer luftstötksågsbelastningen är laddningens storlek, avståndet till föremålet och föremålets geometri och placering i förhållande till laddningen. Andra faktorer, som tidigare nämnts, och som också kan ha betydelse är typ av och form hos sprängmedlet, detonationshöjden över mark, markytans utseende och eventuellt hölje.

Verkan på en konstruktion utsatt för en luftstötstång beror ofta av trycket och lastpulsens varaktighet. Vid kort varaktighet kan lasten ha verkat färdigt innan konstruktionen har hunnit skadas. Vid längre varaktighet hos lasten blir verkan ungefär densamma som en plötsligt påförd långvarig last. Om en last är kortvarig eller långvarig beror på vad den belastar.

En konstruktion kan karakteriseras av sin styvhet. Ett sätt att uppskatta styvheten i en konstruktion är att mäta hur lång tid det tar för konstruktionen att svänga. En flaggstång är ett exempel på en väldigt vek konstruktion. När flaggstången börjar svänga fram och tillbaka (exempelvis i vinden) är svängningstiden ofta en eller flera sekunder. För ett bjälklag kan motsvarande s.k. egensvängningstid vara 10-tals till hundratals millisekunder och för styva väggar enstaka till tiotals millisekunder. Vad som är kort varaktighet för en flaggstång kan därför vara en långvarig belastning för en vägg. Verkan mot konstruktioner sägs vara impuls känsliga när den beror både av tryck och av varaktighet.

Nära små laddningar, något kg, är lastens varaktighet mindre än en millisekund. På större avstånd och från större laddningar är varaktigheten några millisekunder upp till tiotals millisekunder.

Om en vägg träffas av en inkommande luftstötstång kommer trycket att öka på grund av reflexion enligt ovan. Tryckets varaktighet påverkas också. Om den exponerade ytan är stor blir tryckets varaktighet längre än vid en mindre byggnad då s.k. förtunningsvågor som bildas vid gavlarna medför en avlastning. Trycket mot tak och övriga väggar kan vara komplicerat och beror på byggnadens geometri. Man noterar exempelvis, att trycket mot ett snedställt tak kan bli negativt – taket utsätts för sugkrafter. Samma fenomen kan man se vid kraftiga stormar då hela tak lyfts loss och tegelpannor slungas upp i luften av vindkrafter.

Som nämnts ovan kombineras verkan av luftstötstångar med verkan från splitter. Splitterverkan beskrivs i avsnitten 3.2.1. Verkan kan direkt skada exempelvis en byggnad eller ett fordon. Stötstången kan – utöver direkta skador – också ge upphov till indirekta skador på personal och utrustning som befinner sig inne i en tryckbelastad byggnad eller i ett fordon. Särskilt stor är risken för personal som befinner sig bakom bräckliga delar i en byggnad, främst fönster, eller i lätta fordon, som kan kastas iväg med stora skador som följd.

4.1.9 Människans tålighet mot luftstötstångar

Man talar ofta om tre olika typer av skador på människor av luftstötstångar, dels sådana som beror av direkta, primära, effekter, dels av indirekta, sekundära och tertiära effekter.

- Primära effekter

De primära effekterna beror av övertryckets storlek och varaktighet. Olika delar av människokroppen reagerar väldigt olika på övertryck. Örats trumhinnor är särskilt känsliga. Skadorna påverkas av hur snabbt ett tryck påförs. Om trycket byggs upp långsamt ökar tåligheten. Storlek, ålder och allmänkondition är viktiga vid bedömning av förväntade skador. Särskilt känsliga utöver trumhinnor och lungor är struphuvudet, luftstrupen och buken.

Några exempel på skadeverkan av luftstöt vågor mot människor ges i *Tabell 4.1* baserad på FortH2¹⁵. Det måste betonas, att de individuella variationerna är stora.

Tabell 4.1. Exempel på primära skador av luftstöt vågor mot oskyddade människor enligt FortH2

| Max övertryck | Bröst, buk, hals | Oskyddat hörselorgan |
|---------------|---|---|
| 25 kPa | Inga obehag | 1 % risk, lätt skada |
| 45 kPa | Visst obehag, ingen skada | 10 % risk, ingen svår skada |
| 70 kPa | Tröskelvärde för lungskador, lätta skador | 30 % risk, en del svåra skador |
| 200 kPa | 1 % mortalitet, medelsvåra och svåra lungskador | 80 % risk, ett stort antal svåra skador |

- Sekundära effekter

Sekundära skador uppkommer av splitter och kringkastade föremål. Utslagsgivande är då storlek, form och hastighet hos dessa föremål samt hur och var de träffar. Allvarligaste skadorna sker vanligen då splitter träffar huvud eller bälgen medan träffar på armar eller ben vanligen inte ger livshotande skador.

- Tertiära effekter

Tertiära skador uppkommer på grund av att kroppen kastas iväg av luftstöt vågen och sedan stoppas av mark eller hinder i dess väg. Resultatet kan ofta bli huvudskador, skador på vitala organ och arm- eller benbrott.

4.1.10 Skydd mot luftstöt vågor

Det bästa skyddet mot luftstöt vågor är avstånd eftersom trycket avtar hastigt med avståndet från laddningen. Skydd från mindre laddningar kan man också

15. Fortifikationshandbok del 2, FortH 2, 1991, M7747-707122.

få genom läverkan t.ex. i en skyddsgrop. Viss läverkan kan man få nära en barriär. Hesco Bastions¹⁶ är exempel på sådana barriärer.

Byggnadstekniska skydd kan utformas att ge skydd även mot kraftiga stötvågseffekter. Både konstruktionens massa och hållfasthetsegenskaper är viktiga. Detta leder ofta till skyddskonstruktioner av armerad betong.

4.1.11 Sprängverkan och markstötvågsverkan

Om en sprängmedelsdetonation sker i direkt kontakt med mark eller annat fast material fås skador genom sprängverkan. Anläggningar i mark kan påverkas kraftigt av sprängverkan. Delar kan krossas och en krater uppkomma. På större avstånd fås en stötvåg som breder ut sig i marken. Denna markstötvåg ger upphov till rörelser i marken. Ett skyddsrum i mark kan skadas. Material på väggarna kan slitas loss och bli till farliga projektiler. Både väggar och golv kan få stora och farliga accelerationer. Detta medför i regel att anläggningen måste ha stor massa och styvhet för att ge tillräckligt skydd. Särskild uppmärksamhet kan behöva ägnas åt transienta vibrationer som kan spridas i anläggningen.

Olika delar av människan är olika känsliga för accelerationer och under hur lång tid dessa verkar. Även vid mycket kortvarig exponering (millisekunder) kan höga accelerationer ge svåra skador.

Det är därför viktigt för personal i ett sådant skydd att inte vara i direkt kontakt med väggar eller golv. Ett "flytande golv" kan vara ett sätt att skydda personalen från markskakningseffekter. Liknande överväganden ligger bakom dubbla golv i fordon som skall skydda mot minverkan, se avsnitten 5.2 och 11.3.

4.1.12 Verkan av vattenstötvåg/undervattensdetonation

Konventionella undervattensstridsdelar verkar mot fartyg på i huvudsak tre olika sätt.

Om en laddning detonerar nära skrovet fås verkan genom splitter och stötvåg som kan leda till genomslag av fartygsskrovet.

Laddningar på stora avstånd kan orsaka att hela fartyget skadas genom böjsvängningar av de tryckpulser som uppkommer vid undervattensdetonationen, bör lyda: Laddningar på väl anpassat djup kan orsaka att hela fartyget skadas genom böjsvängningar av de tryckpulser som uppkommer vid undervattensdetonationen.

De tre skadeformerna kan naturligtvis förekomma kombinerade, se vidare avsnitt 12.1.

16. Se t.ex. Bengt Vretblad, Riskanalys ger säkrare hantering av ammunition. Framsyn nr 1-2005.

Ur skyddssynpunkt leder detta till krav på utformningen av fartyg för att hindra eller begränsa såväl lokala skador som skador på fartyget som helhet och komponenter och annan utrustning i fartyget.

4.2 Brandverkande stridsdelar

Brandstridsmedel är vapen eller ammunition som verkar genom brand. Brandprojektiler fyllda med harts, svavel, beck och kol användes av romarna både till lands och till sjöss. Arabernas anfall mot Konstantinopel åren 674-678 hejdades med den berömda ”grekiska elden”, som sprutades eller sköts mot fiendens skepp. Den kemiska sammansättningen är inte säkert känd, men osläckt kalk, petroleum, svavel och salpeter torde ha ingått. Elden sprutades och sköts mot fiendens skepp och kunde inte släckas med vatten. När man i nyare tid belägrade fasta orter med hjälp av artilleri, antände man husen innanför murarna med brandbomber och glödgade kulor som kastades av mörsare¹⁷.

Brandstridsdelar indelas, beroende på sammansättning, i:

- Oljebrandämnen
- Metallbrandämnen
- Kombinerade olje- och metallbrandämnen
- Fosforbrandämnen

Brandstridsdelar används numera oftast inte mot militära mål då de inte är speciellt effektiva. De är dessutom förbjudna enligt Genève-konventionen 1980. Under andra världskriget användes de förutom mot trupp också som terrorvapen mot stadsbefolkningar. Bombningar med brandstridsdelar åstadkom eldstormar som gjorde att folk brändes eller kvävdes till döds. Bland de typer av brandmedel som användes märks napalm, vit fosfor och termit.

Napalm är ett oljebrandämne och består av en blandning av bensen och alunat. Ordet napalm kommer av naftensyra och alifatiska fettsyror (t.ex. palmitinsyra) från kokosfett. För användning som brandstridsmedel förtjockas bensen och olja med 4-12 % napalm varvid en tixotrop¹⁸ gel bildas. Den sprids med eldkastare eller bomber, har god vidhäftningsförmåga och vållar djupa, mycket svårläkta brännsår. Förbränningstemperaturen kan genom ytterligare tillsatser höjas från 675° C till 1 000° C. Napalm utvecklades i USA som brandstridsmedel främst för eldkastare och bomber under andra världskriget och användes såväl mot civila som militära mål i Tyskland och Japan samt senare i Vietnamkriget.

17. Källa: Nationalencyklopedin.

18. Jmf s.k. droppfri målarfärg.

Termit är ett metallbrandämne och utgörs av en blandning av metalloxider och aluminiumpulver, som efter antändning brinner under mycket stark värmeutveckling, varvid aluminium oxideras och metalloxiden reduceras¹⁹. Brinntemperaturen är ca 2 500°C.

Elektron är ett annat metallbrandämne och består av en magnesium-aluminium-legering och brinntemperaturen är ca 3 000°C.

4.3 Kombinationsstridsdelar

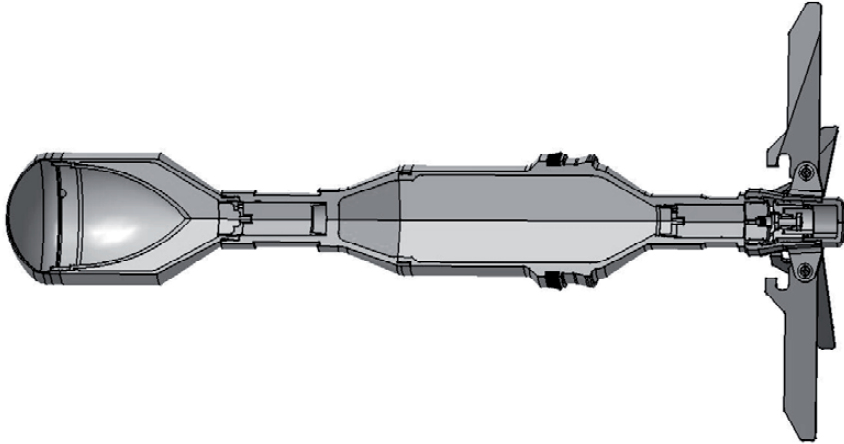
4.3.1 Tandemstridsdelar

Tandemstridsdelar kan ses som en typ av kombinationsstridsdelar men dessa har behandlats under avsnitt 3.3.3.

4.3.2 Flerfunktionsstridsdelar

Genom att kombinera två eller flera verkanstyper i en och samma laddning kan en förhöjd, alternativt valbar, verkan uppnås. Som exempel på den förra typen kan tas stridsdelar som är avsedda att slå ut betongkonstruktioner som t.ex. landningsbanorna på flygbaser, bunkrar under jord. Dessa består ofta av en kraftig RSV-laddning som slår ett hål i banan/bunkern, därefter kommer tryckverkanstridsdelen som går ner i hålet och detonerar djupt ner i marken/bunkern. Eftersom tryckverkanstridsdelen får verka i en fördämd miljö åstadkommer man på detta sätt väsentligt större skador än om den skulle ha detonerat vid anslaget mot marken.

19. Källa: Nationalencyklopedin.



Figur 4.6. 84 mm AT4CS AST. Exempel på tandemladdning med olika stridsdelar. Förpenetratorn är en hålslagare av RSVE-typ som gör kaliberstora hål i väggar, samt verkan i medeltungt pansar. Huvudladdningen är här en termobarisk laddning som detonerar innanför väggen (Follow through charge), eller i vägg för att skapa bräschhål. Mot pansarfordon detonerar den mot pansaret och ger viss s.k. squashhead effekt²⁰ samt högt tryck genom öppna luckor. (Källa: SAAB Bofors Dynamics)

4.4 Adaptiva stridsdelar

Adaptiv stridsdel är en stridsdel som före skott eller autonomt vid anslag kan välja en funktionsmod som är optimal för valt mål. (Till skillnad från flermålsammuniton som kan verka mot flera måltyper men med den kompromiss av verkan som är inbyggd). Den adaptiva förmågan kan bestå i att stridsdelen genererar antingen splitter, projektil, stråle eller en kombination av dessa beroende på vilket mål som ska bekämpas. Detta kan åstadkommas på flera olika sätt. En enkel metod är att genom initieringsmekanismen styra detonationsfronten så att önskad verkansmod genereras. Även andra metoder kan utnyttjas, t.ex. genom att störa inläggets kollaps med hjälp av tillsatser på höljet eller på inlägget konkava sida.

4.5 Improviserade stridsdelar

Med improviserade stridsdelar (IED – Improvised Explosive Devices) menas olika former av ”hembyggda” stridsdelar.²¹ Dessa kan vara allt från brevbomber, väskor innehållande sprängämne, självmordsbombare och bilbomber till mer avancerade splittergenererande och pansarbrytande stridsdelstyper. Även hembyggda vapen som granatkastare och raketer förekommer.

20. Utslagning av splitter på insidan av skyddet utan att penetration sker.

21. Tyrberg Andreas, Menning Dennis. Lägesrapport – Klassificering av hotbild IED. FOI-R--2255--SE. Stockholm 2007.

Improviserade stridsdelar har blivit mycket aktuella i samband med internationella operationer och vid terroristattentat men är ingen ny företeelse. Större mängder explosivämnen som lämnas i väskor, bilar o dyl. har tidigare använts vid enstaka tillfällen men har vid senare tiders konflikter blivit mycket mer frekventa. De japanska Kamikazepiloterna var självmordsbombare som bekämpade speciellt utvalda militära mål medan de nu omskrivna självmordsbombarna ofta angriper civila mål i syfte att uppnå politiska snarare än militära mål.

Improviserade stridsdelar förekommer i alla väpnade konflikter och ingår i normal utbildning av militär personal. I sådana sammanhang används befintlig militär materiel på ett annat sätt än den ursprungligen var avsedd att användas för. Exempel på detta är att använda spränggranater som minor²².

22. Anders Bryntse. Modellering av luftstötväg från VBIED. FOI-R--2500--SE. ISSN 1650-1942 Stockholm juni 2008.

5. Ballistiskt skydd mot konventionella verkansformer

Ballistiska skydd ska i första hand skydda mot penetrerande och tryckverkande stridsdelar. Brandstridsdelar har använts mer som terrorvapen än som militärt hot men detta har i viss mån ändrats i och med att strid i ort blivit alltmer frekvent. Tryckverkande stridsdelar (t.ex. minor, flygbomber, tryckvåg från kärnladdning mm) verkar över större ytor på målet vilket kan resultera i strukturskador och att hela skyddsobjektet kastas iväg, medan penetrerande stridsdelar (projektiler, splitter- eller RSV-strålar) ger punktverkan som leder till inträngning i målet.

Penetrerande stridsdelar är det dominerande hotet mot markmål och flygmål varför det ballistiska skyddet i dessa fall dimensioneras för att huvudsakligen klara detta hot. På senare tid har dock minhotet gjort att framför allt bottenkydd på fordon dimensioneras för att tåla tryckpåverkan. I framtiden krävs även skydd mot penetrerande minor. På fartygssidan har hotet dominerats av tryckverkansstridsdelar (minor, torpeder och sjömålsmissiler) och i någon mån sjömålsgranater för att på senare tid ha utökats till att även gälla handeldvapen och olika typer av pansarvärnsvapen (kustnära internationella operationer). Tryckverkande stridsdelar utgör också ett betydande hot mot byggnader och fortifikationer.

5.1 Ballistiska skydd mot penetrerande stridsdelar

Ballistiska skydd mot penetrerande stridsdelar bygger normalt på mekanisk påverkan på penetratorn även om andra mekanismer som elektrisk/elektromagnetisk påverkan har börjat studeras.

Skydd mot penetrerande stridsdelar har traditionellt bestått av en tillräckligt tjock pansarplåt men består numera ofta av flera delkomponenter som samverkar för att stoppa penetratorn. Yttre skyddskomponenter har till uppgift att slå sönder, snedställa eller sprida ut projektilen/strålen. Därefter följer skyddskomponenter som ska bromsa in eller konsumera projektilrester/RSV-fragment. Till sist har man också en inre komponent som skall minska eventuell restverkan inuti skyddsobjektet.

Intressant i samband med ballistiskt skydd mot penetrerande stridsdelar är vad som händer under penetration av ett homogent målmaterial, hur randstörningar vid in- och utträde ur målmaterialiet inverkar samt hur penetratorn påverkas av olika geometriska störningar.

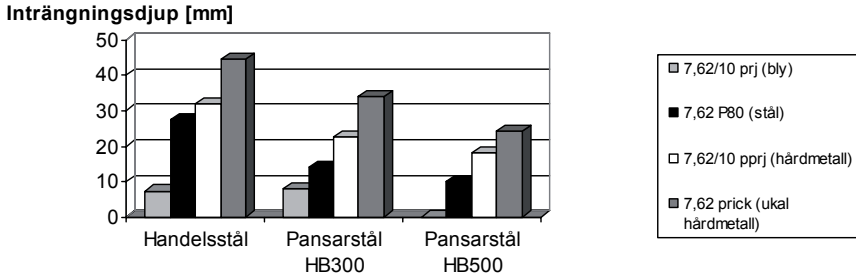
5.1.1 Homogena skyddsmaterial – metaller

De flesta stridsfordon har bärande konstruktioner av metalliska material. Då metaller har god skyddsförmåga mot de flesta stridsdelstyper är det naturligt att åstadkomma skydd genom att göra den bärande konstruktionen tillräckligt tjock för att stoppa hotet.

Det dominerande materialet i ballistiska skydd är pansarstål, framför allt därför att det är ett bra och billigt konstruktionsmaterial med hög hållfasthet. För att klara både struktur- och pansarfunktionen har ett stort utvecklingsarbete lagts ner på att utveckla hårda, sega och svetsbara stålqualitéer. Moderna pansarstål har därför väsentligt högre skyddsförmåga än de som tidigare använts.

Pansarstål, som skydd mot projektiler och RSV-stridsdelar, ska vara hårt. Anledningen till detta är att, för de finkalibriga projektilerna, de ska deformeras och få en större anslagsyta att, för pilprojektilerna, de konsumeras effektivare och att, för RSV-stridsdelar, hålskanalen blir trängre så den bakre delen av RSV-strålen har svårt att nå ner till hålbotten.

Figur 5.1 visar som exempel hur inträngningsförmågan i homogent stål minskar med ökande hårdhet på stålet för några olika typer av finkalibriga projektiler. Den mjukaste projektiltypen (bly) deformeras redan mot handelsstål varvid en ökning av hårdheten inte ger någon ökad skyddseffekt förrän hårdheten blir så hög att projektilen bara flyter ut på ytan. Stålprojektilen behåller sin form vid penetration i handelsstål men deformeras mot pansarstålet vilket resulterar i en drastisk nedgång av penetrationsförmågan vid övergången från handelsstål till HB300-stål. Hårdmetallprojektilerna (pprj och prick) behåller sin form i alla tre stålqualiteterna men den högre hållfastheten gör att stålets motståndsförmåga ökar varvid projektilernas penetrationsförmåga gradvis minskar.



Figur 5.1. Inträngningsförmågan i homogent stål som funktion av hårdhet på stålet för några olika typer av finkaliber projektiler. (Källa: FOI)

För pilprojektiler med projektilhastigheten 1 500 m/s ger en ökning av hårdheten från 300 till 600 Vickers att skyddsförmågan ökar med 30 %. Vid riktigt höga projektilhastigheter minskar effekten av hårdheten eftersom tröghetskrafterna får större betydelse, exempelvis är ökningen av skyddsförmågan med hårdheten enligt ovan bara 10 % vid 2 500 m/s.

Ett mycket hårt stål blir normalt samtidigt sprött. Detta innebär problem genom att plåten kan spricka och att delar av plåtens baksida kan kastas in i fordonet (utstötningseffekter). De nya segare stålsorterna har lättare att ta upp dessa dragspänningar. Stål som skydd mot splitter ska vara segt. Hårdheten behövs inte för att deformera splittren eftersom de oftast redan har en för penetration ogynnsam geometri.

De metaller förutom stål som används som ballistiska skydd är främst legeringar av lättmetallerna aluminium och titan. Aluminium används framförallt i lätta stridsfordon. Titan används i vissa detaljer, som luckor, i pansrade fordon men framförallt i flygplan och helikoptrar där viktskraven är hårda samtidigt som priset kan tillåtas vara högt. Även metaller med hög densitet, till exempel uranlegeringar, kan användas då volymkraven är stränga. *Tabell 5.1* visar några i skyddssammanhang viktiga egenskaper för dessa metaller.

Tabell 5.1. I skyddssammanhang viktiga egenskaper för dessa metaller

| | Densitet' [kg/m ³] | Hårdhet [HB] | Flytspänning [MPa] |
|--------------------|--------------------------------|--------------|--------------------|
| Normalt pansarstål | 7 800 | 240-380 | 700 |
| Hårt pansarstål | 7 800 | 500-600 | 1 400 |
| Aluminiumlegering | 2 700 | 100-150 | 500 |
| Titanlegering | 4 500 | 300-370 | 1 400 |
| Uranlegering | 18 600 | 400-500 | 1 000 |

Aluminium som ballistiskt skydd har en viktsskyddsförmåga som varierar beroende på projektiltyp och aluminiumkvalitet men är generellt ungefär densamma som för normalt pansarstål. Det betyder att skydden blir lika tunga men ca tre gånger så tjocka som motsvarande skydd av pansarstål. För lätta hot är den ökade tjockleken en fördel då den ger bättre strukturbärande egenskaper vid konstruktion av lätta vapenplattformar medan den vid tyngre hot är en nackdel på grund av den stora volym som krävs.

Mot pilprojektiler fås storleksordningen 10 % bättre skyddsförmåga med aluminium jämfört med pansarstål oberoende av hastigheten. Den ökade skyddsförmågan beror inte på hållfastheten eftersom även de bästa aluminiumlegeringarna har en låg hållfastheten jämfört med stål. Den bättre skyddsförmågan relativt stål beror i stället på den låga densiteten och tröghetskrafterna. Aluminium har visat sig vara effektivt som skydd mot RSV. Den höga skyddsförmågan beror därför dels på den låga densiteten, dels på så kallade closure-effekter som innebär att målmaterialiet strömmar tillbaka och stör bakomvarande stråldelar. Nackdelen med aluminium som RSV-skydd är dock att skydden blir tjocka.

Det höga priset på titan beror till stor del på de stränga utmattningskrav som ställts från den dominerande kunden, flygindustrin. På senare tid har lågprisvarianter av titan för andra tillämpningar börjat framställas vilket medfört att intresset för titan som ballistiskt skydd i pansrade fordon har ökat kraftigt. Titan är mycket viktseffektivt mot alla typer av penetratorer då det har hållfasthetsegenskaper i klass med höghållfast stål men väsentligt lägre densitet. Som tumregel kan sägas att inträngningsdjupet för pansarbrytande projektiler i alla kalibrar är lika stor i titan som i pansarstål. Eftersom titanets densitet bara är drygt hälften av stålets blir titanskyddet endast drygt hälften så tungt.

Två intressanta utvecklingslinjer för metalliska material är metaller med nano- respektive amorf struktur. Dessa har potential att kunna ge material med extremt goda hållfasthetsegenskaper vilket på sikt bör kunna utnyttjas i ballistiska skydd.

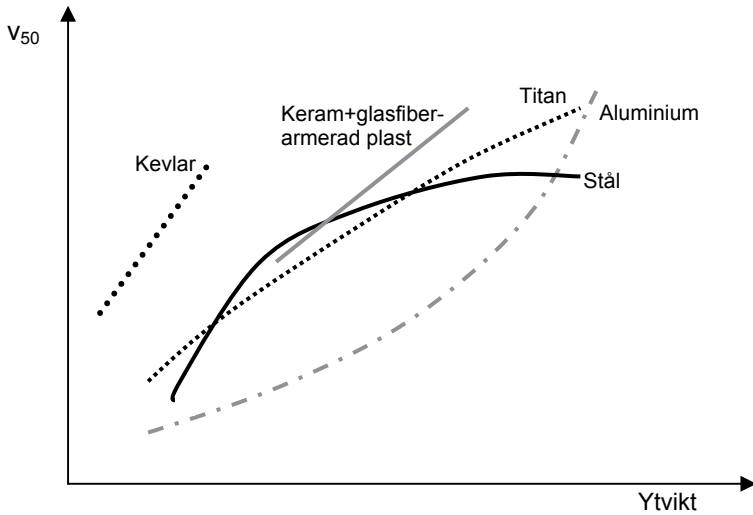
5.1.2 Homogena skyddsmaterial – fiberbaserade material

Fibrer har mycket hög hållfasthet i fiberriktningen men mycket liten hållfasthet tvärs denna. Om man konstruerar vävar eller laminat där belastningen tas upp av fibrerna kan man få lätta och starka konstruktioner.

De fibrer som används i ballistiska skydd är till största delen baserade på polymera material som polyaramid (Kevlar, Twaron) och polyeten (Dyneema, Spectra). Ett polymert material är uppbyggt av molekyllkedjor. Om man sträcker plasten kraftigt i en riktning orienteras alla dessa molekyllkedjor åt samma håll varvid man erhåller mycket hög hållfasthet i denna riktning. Även glasfiber

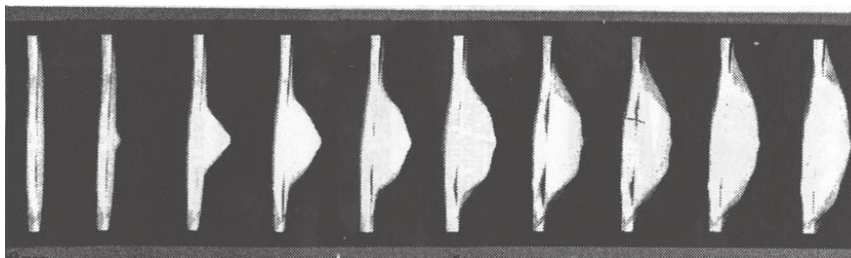
används eftersom det är relativt billigt. De kan dock endast användas i laminerat skick. Diagrammet nedan visar specifika mekaniska egenskaper (egenskap i förhållande till densitet) för ett stort antal fibrer. Kolfiber har, på grund av sin sprödhet, trots sina i övrigt goda mekaniska egenskaper visat sig vara olämpligt i ballistiska skydd.

Packar av vävar bestående av sådana mycket starka fibrer ger de mest viktseffektiva skydden mot små, relativt långsamma splittr. *Figur 5.2* visar vid vilken maximal splittrhastighet ett 1 g stålsplittr kan stoppas med ett skydd med viss ytvikt (skydd per areaenhet) och ger en uppfattning om att fiberbaserade skydd (i detta fall kevlar) är mycket viktseffektiva.



Figur 5.2. Splittrhastighet vid vilken ett 1 g stålsplittr kan stoppas med ett skydd med viss ytvikt. V_{50} anger den hastighet vid vilken 50% av splittr (projektilerna) tränger igenom skyddet. (Källa: FOI)

Skyddsvävarnas formbarhet gör dem fördelaktiga som skyddsmaterial i kroppsskyddsvästar. Formbarheten är dock en nackdel då de ska användas som bärande material i huvar, luckor, fordon etc. Ett alternativ är då att laminera fibrerna. Ett fiberlaminat består av lastupptagande fibrer bundna med en matris. Fibrerna kan vara av glas eller polymera material enligt ovan, och matrisen är oftast plast eller gummi. Fiberlaminat som används som skydd har mycket hög fiberhalt och orienterade fibrer. Fiberbaserade ballistiska skydd fungerar framförallt genom att fånga in och bromsa upp splittr/projektilen. Hur skyddet arbetar framgår av filmsekvensen i *Figur 5.3* där en projektil skjuts från vänster mot ett vävpaket. Fibrer över hela vävytan hjälper till att fånga upp projektilen. Om hastigheten är för hög hinner inte de omkringliggande trådarna reagera. Penetratorn stansar då bara ut ett litet hål i väven varvid väven inte tar upp särskilt mycket energi.



Figur 5.3. Filmsekvensen där en projektil skjuts mot ett vävpaket. Skjutriktning från vänster. (Källa: FOI)

Av filmsekvensen framgår att det måste finnas utrymme bakom skyddet som tillåter utbuktning. Det ställer också krav på att skyddsvästar, där skyddet ligger an mot kroppen, dimensioneras så att icke-penetrerande trubbigt våld ("blunt trauma") minimeras.

Vid laminering läses fibrerna så att de får svårare att förskjutas och arbeta enligt filmsekvensen varvid skyddsförmågan sjunker. Det är därför nödvändigt att laminaten har så låg vidhäftning till fibrerna att de delamineras²³ vid träff. Vanliga konstruktionslaminat har däremot krav på god vidhäftning mellan fibrer och matris. Fiberhalt, vidhäftning och o-orienterade fibrer gör att till exempel fordonschassin av fiberlaminat inte är särskilt bra som skydd. Då man vill ha både struktur- och skyddsegenskaper får man därför bygga en del av tjockleken enligt kraven för konstruktionslaminat och resten enligt kraven för skyddslaminat.

Fiberbaserade ballistiska skydd är alltså mycket effektiva mot små, relativt långsamma splitter. Även om splitterstridsdelar ger splitter med relativt hög hastighet och mycket varierande massa har flertalet splitter låg massa, några få gram. Splitter med låg massa bromsas snabbt upp av luftmotståndet så att man endast några meter från brisadpunkten har hastigheter möjliga att stoppa med fiberbaserade skydd. Däremot är de rena fiberbaserade skydden oftast inte viktseffektiva som skydd mot finkalibriga projektiler eftersom belastningen är för stor (hög hastighet och massa) och projektilformen gynnsam för penetration. I kombination med ett hårt frontskydd som deformerar projektilen och fördelar belastningen över en större yta kan dock viktseffektiva skydd med fiberbaserade material som en komponent erhållas.

Fiberbaserade skydd har också god skyddsförmåga mot RSV-stridsdelar. Glasfiberarmerad plast med hög glasfiberhalt används som skydd mot RSV. Hållkanalen i glasfiberlaminatet blir slingrande och smal, vilket gör att snedställda delar av RSV-strålen lätt träffar hålväggen i stället för hålbotten. Om man varvar glasfiberplattor med keramplattor fås ett ytterligare förbättrat skydd

23. "Delaminering" innebär i första hand att olika "skikt" lossar från varandra.

jämfört med såväl homogent glasfiberlaminat som homogen keram. En tänkbar förklaring till detta kan vara att laminatet verkar som dämpmaterial mellan keramskikten, så att keramens krossning fördröjs. Särskilda effekter kan uppstå i gränsytorerna mellan de olika materialen som också kan bidra till skyddsförmågan. Skydd mot RSV-stridsdelar måste oftast också klara pansarbrytande projektiler. Glasfiberarmerad plast är dock inte skyddseffektivt mot pansarbrytande projektiler men om det kombineras med metaller och/eller keramer kan man erhålla god skyddseffekt från den glasfiberarmerade plasten även mot detta hot.

Fiberkompositer används också som sekundärsplitterskydd inuti farkoster, så kallade ”spall liners”, varvid verkan vid genomslag minskas genom att antalet sekundärsplitter begränsas.

5.1.3 Homogena skyddsmaterial – keramer

Ett kerampansar är ett skydd där keramer ingår som en huvudbeståndsdel. Den strikta definitionen på keramiska material är icke-metalliska material som framställs vid temperaturer över 600°C. Denna definition medför att en mängd material kan klassas som keramer, till exempel tegel, stengods och porslin. De keramer som används i skyddssammanhang tillhör de så kallade konstruktionskeramerna. Till dessa hör bl.a. aluminiumoxid, kiselkarbid, titandiborid och borkarbid.

Keramer har normalt låg densitet. Konstruktionskeramer kännetecknas av hög tryckhållfasthet och hårdhet vilket i kombination med den låga densiteten är fördelaktigt ur skyddssynpunkt, se *Tabell 5.2*.

Tabell 5.2. Några konstruktionskeramers hållfasthetsegenskaper

| | Hårdhet [HV kg/mm ²] | Densitet [kg/m ³] |
|--------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Normalt pansarstål | 300 | 7 850 |
| Aluminiumoxid | 1 600 | 3 900 |
| Borkarbid | 3 000 | 2 450 |
| Titandiborid | 2 600 | 4 250 |
| Kiselkarbid | 2 300 | 3 150 |

Keramers hållfasthet beror, förutom av vilken typ av keram man använder, också på tillverkningsproceduren. Till exempel har ett hetisostatiskt²⁴ pressat

24. Ämnet utsätts, under värme, för lika tryck från alla håll.

material betydligt högre hållfasthet än ett trycklöst sintrat material. Porositeten har också stor betydelse – så lite porer som möjligt är önskvärt. Från att det tidigare endast rörde sig om ett fåtal olika kerammaterial finns idag en mycket stor skara som kan användas i pansartillämpningar. Flera leverantörer av en keramtyp resulterar också i många olika kvaliteter av samma materialtyp.

Keramer karaktäriseras förutom av hög hårdhet också av stor sprödhet, brottsegheten är ca 1/15 av pansarståls. Detta innebär att den hållfasthetsrelaterade delen av penetrationsförloppet i huvudsak styrs av brottmekaniska processer där materialet fragmenteras, krossas och förflyttas, istället för att som för metaller deformeras plastiskt. Detta är ofördelaktigt för skyddsförmågan och stora ansträngningar görs för att få fram segare kerammaterial med bibehållen hårdhet. Tänkbara vägar är att förfina mikrostrukturen (nanomaterial), att utveckla kompositers sammansatta av flera olika kerammaterial eller keram-metall blandningar (CMC, MMC) eller att tillsätta försegande strukturer (fibrer, whiskers) som ökar segheten.

En annan metod att undertrycka kerammaterialens sprödhet och därmed göra dem mer lämpade för pansartillämpningar är att redan vid tillverkningen sammanfoga keramaterialet med skikt eller skal av metall till sandwichstrukturer eller gradientmaterial med skräddarsydda egenskaper. Denna typ av kerammaterial förväntas komma till användning i ökande omfattning efterhand som nya sammanfogningstekniker och beräkningsverktyg för materialoptimering utvecklas.

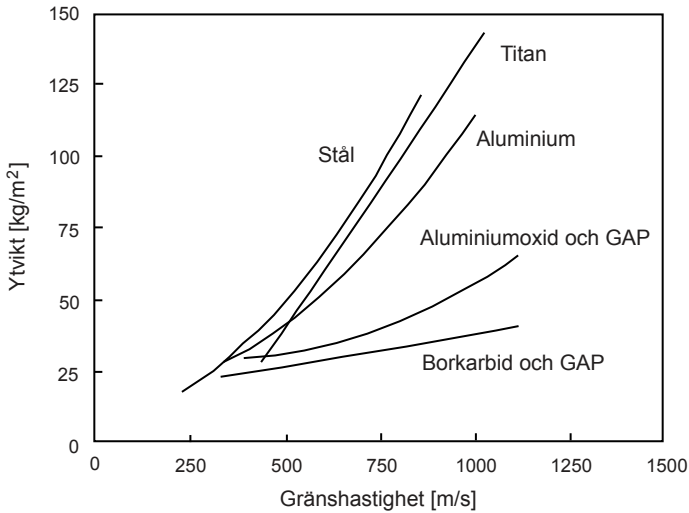
Vid användning av keramer i pansar används keramen alltid i kombination med ett eller flera andra material. Vid lättare hot (finkalibriga projektiler av normaltyp) deformerar den hårda keramytan projektilen varefter ett segt material bromsar upp resterna av projektil och keram. Vid tyngre hot kan man behöva fördämnings- och/eller uppbackningsmaterial för att ge strukturen tillräcklig böjstyvhet samt öka motståndet mot fragmentering och förflyttning av den krossade keramen. Kerampansaret har oftast också ett tunt frontskydd som ska skydda keramaterialet mot lågnivåhot och hjälpa till att hålla större fragment på plats om sprickor uppstår.

Fördämningen är inte bara viktig för att få ut god skyddseffekt av keramen utan också för att få flerskottskapacitet. Allt detta gör att val av övriga material och konstruktionen av hela pansaret är lika viktigt som val av keram.

För finkalibriga projektiler av normaltyp, där hastigheterna är ca 1 000 m/s eller mindre, används ofta enkla kerampansar bestående av en mosaik av rektangulära eller hexagonala keramplattor limmade på en ”backing” av fiberkomposit och innesluten av ett eller ett par lager ballistisk väv. I kroppsskydd används ofta formpressade plattor innehållande såväl keram som uppbackningsmaterial.

Keramens hårdhet gör att projektilen plattas till varvid dess penetrationsförmåga minskar. Samtidigt krossas keramen under projektilen så att energin fördelas över en större yta av uppbackningsmaterialet. Uppbackningsmaterialet är ett segt och starkt material, oftast fiberkomposit som har till uppgift att fånga upp den deformerade projektilen och den krossade keramen. Viktsfördelningen i denna typ av pansar kan typiskt vara 2/3 keram och 1/3 uppbackningsmaterial.

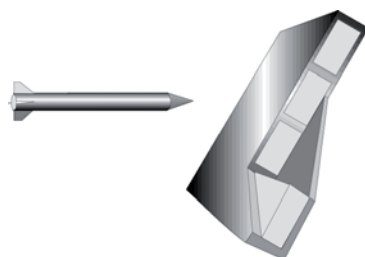
Dessa enkla kerampansarter är väsentligt lättare än metallpansar mot flertalet finkalibriga projektiltyper vilket illustreras i *Figur 5.4*. Keramtypen har i detta fall större inflytande på skyddsförmågan än uppbackningsmaterialet.



Figur 5.4. En jämförelse mellan metall- och kerampansar mot 7,62 mm pansarprojektil med stål kärna. (Källa: FOI)

Pansarbrytande finkalibrig ammunition med en kärna av hårdmetall har så hög hållfasthet i kärnan att den inte deformeras av keramen i ett för kroppsskydd konventionellt kerampansar. Man måste då utnyttja keramens hållfasthet på ett bättre sätt. Om det sega uppbackningsmaterialet byts ut mot ett styvt material, till exempel pansarstål, undviks dragspänningar i keramen som därmed klarar belastningen bättre.

För pilprojektiler, där hastigheten är ca 1 500 m/s och högre, är penetrationsförloppet annorlunda än den deformation och inbromsning som äger rum i finkaliberfallet. Här används betydligt tjockare keramer som ska konsumera projektilen, inte bara vara ett tillägg som deformerar projektilen, samt kraftigare uppbackning och sidfördämning. Sidfördämningen är vanligtvis relativt tunn och impedansanpassad med hjälp av fyllmedel eller geometriska former.



Figur 5.5. Principiell uppbyggnad av kerampansar mot höghastighetspilar. (Källa:FOI)

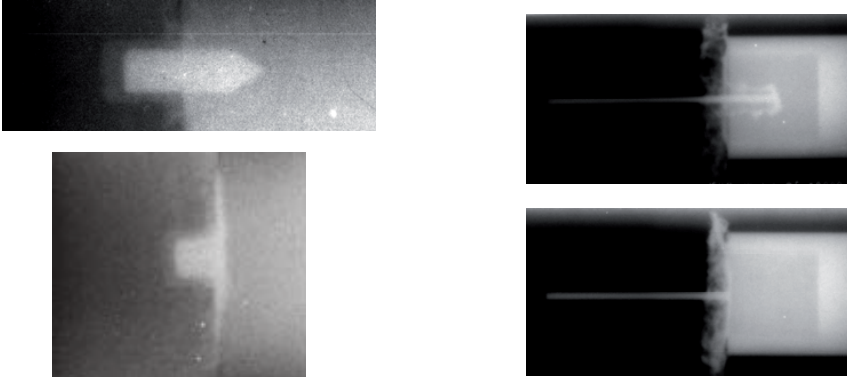
Skyddsförmågan för denna typ av pansar beror både av vilken typ av keram som används, material i och anpassning till uppbackning och sidofördämning, samt hur stor del av penetrationen som tas upp i kerammaterialet. Viktvinster på 2-3 ggr relativt pansarstål kan erhållas med denna typ av utförande.

Röntgenblytbilder som tagits under penetrationen visar att förloppet liknar det som äger rum vid penetration av metaller, det vill säga ett ”hydrodynamiskt förlopp” där projektil och keram konsumeras i hålbotten. Förloppet är dock inte lika stationärt och symmetriskt som i metallfallet, utan mer ”pulserande” och osymmetriskt vilket beror på att penetrationskanalen uppstår på grund av brott i keramer, inte genom plastisk flytning som i metaller.

Ett speciellt problem med keramer är att de krossas tidigt under penetrationsprocessen så att penetratorn under en stor del av penetrationsförloppet rör sig i mer eller mindre krossad keram. Denna har helt andra egenskaper än den opåverkade keramen varför hållfastheten ändras under penetrationsförloppets gång.

Genom att kapsla in kerammaterialet via krymp- eller pressförband kan tryckspänningar introduceras i keramen vilka försvårar fragmenteringen och materialtransporten. Sådana konstruktioner uppvisar såväl högre skyddsförmåga som bättre flerskottskapacitet jämfört med motsvarande där keramen endast läggs eller limmas fast i fördämningen.

Genom att kombinera dessa förband med anordningar för styrning av hur projektillasten initialt läggs på keramytan kan så kallat stela-väggen-beteende erhålls (”dwell”, eller ”interface defeat” på engelska). Detta betyder att projektilen inte kan penetrera kerammaterialet utan avlänkas radiellt utan att någon penetration äger rum. Detta kan åstadkommas mot såväl finkalibriga pansarbrytande projektiler som pilprojektiler, se *Figur 5.6*.



Figur 5.6. Genomlysningbilder som visar skillnaden mellan vanligt inträngningsförlopp (ovan) och s.k. stela-väggen-förlopp (nedan) där projektilen stoppas mot skyddets yta utan någon inträngning i målmaterial. Till vänster finkalibrig pansarbrytande projektil, till höger pilprojektil. (Källa: FOI)

RSV-strålens höga hastighet gör att penetrationsförloppet i keramer kan betraktas som huvudsakligen hydrodynamiskt. Försök med RSV-stridsdelar har visat att hållkanalen i en keram blir så trång och oregelbunden att delar av RSV-strålen kan kollidera med hålväggen och därmed förlora sin penetrationsförmåga. Stand-off-kurvan (se avsnitt 3.3.1 och figur 3.23) i ett kerampansar avtar därför snabbare än i ett stålpansar. Det innebär att skyddsförmågan för ett kerampansar ökar relativt ett stålpansar med ökande stand-off och att snedheter i strålen snabbare blir kritiska i keramfallet.

Keramerna förekommer även i RSV-skydd alltid tillsammans med andra material. Man kan på röntgenbilder se att särskilda effekter uppstår i gränssytorna mellan de olika materialen i pansaret. Det är oklart hur dessa effekter bidrar till skyddsförmågan.

Sidofördämningen är av stor betydelse vid skydd mot RSV. Ökad fördämning ger högre skyddsförmåga vilket kan bero på att den lilla håldimensionen bibehålls under hela penetrationsförloppet eller att material lättare kastas in i hållkanalen (hålkollaps).

5.1.4 Homogena skyddsmaterial – övriga material

Metallmatriskompositer, MMC ("Metal Matrix Composites") är material där partiklar av keramiska material bundits samman med hjälp av metaller (matrisen). Keramer är mycket hårda material vilket är önskvärt för material i ballistiska skydd. Ett problem med keramer är dock deras extremt stora sprödhet vilket gör att det krävs att de kombineras med andra material för att kunna utnyttjas. Tanken med metallmatriskompositer är att man ska kombinera keramers höga hårdhet med metallers goda seghet. Även om man då måste ge visst avkall på

hårdheten och därmed skyddsförmågan kan det ibland vara värt det om man till exempel vinner en förbättrad flerskottskapacitet. Eftersom keramer krossas vid penetrationen och en stor del av penetrationsförloppet i tjocka kerammål styrs av den krossade keramens egenskaper skulle MMC-materialen till och med kunna ge bättre skyddsegenskaper än rena keramer. Den stora potentialen hos MMC-material, som skyddsmaterial, har ännu inte kunnat verifieras och utnyttjats i praktiska skyddslösningar.

Nanomaterial är material där storleken på de partiklar materialet är uppbyggt av är extremt liten (en nanometer är lika med 10^{-9} meter, det vill säga ungefär samma storleksordning som diametern på enskilda atomer). Material uppbyggda på detta sätt kan få mycket goda hållfasthetsegenskaper och särskilt för keramer är detta intressant. Nanokeramer kan teoretiskt kombinera hög hårdhet med god seghet och skulle kunna ge keramiska material som bibehåller sin hållfasthet även då de deformeras kraftigt som i penetrationsssammanhang.

Fördämnda vätskor är utmärkta som RSV-skydd. Vid de hastigheter som råder vid RSV-penetration är tröghetskrafterna dominerande varför alla material, inklusive till exempel luft och vatten, konsumerar strålen. Då materialet fördäms slår hålskanalen igen varför den efterföljande RSV-strålen måste göra nytt hål. Denna ”självläkning” är oftast osymmetrisk varvid strålen utsätts för radiella krafter så att fragmenten konsumeras eller snedställs så att de inte kommer ner till hålbotten. Fördämningen får inte vara på längre avstånd från hålet än att den reflekterade stötvågen hinner tillbaka medan penetrationen pågår. Till exempel kan bränsle i bränsletankar uppträda på detta sätt varför bränsletankar utanför huvudpansaret kan utgöra en effektiv del av det ballistiska skyddet.

Vätskors låga hållfasthet och projektilers, jämfört med RSV-strålar, låga hastighet gör att projektiler penetrerar som stela kroppar med mycket stora inträngningsdjup som följd. Vätskor är därför inte vikts- eller volymseffektiva som skydd mot projektiler.

Glas har liksom vätskor amorf (icke-kristallin) struktur trots att det är i fast tillstånd. Glas har goda skyddsegenskaper mot RSV vilket kan bero på att materialet kollapsar lokalt varvid hålskanalen slår igen och blir trång som vid fördämnda vätskor. Viktseffektivitet mot RSV i samma storleksordning som för keram kan uppnås med glas. Glas är dock inte viktseffektivt mot projektiler då det har låg hårdhet och kollapsar till stoft runt penetrationskanalen.

I många fall har man behov av genomskinliga skyddsmaterial. Glas är då hårdare än plast och används därför trots krossbenägenheten. Splitter och finkalibriga projektiler kan stoppas med glaspansar som byggs upp av flera tunna glasskikt hoplammade med tunna sega plastfilmer. Plastfilmerna hindrar att de bakre glasskikten krossas innan de nås av projektilen. Glaset bör också förses med ett tjockare plastskikt på den bakre ytan som fångar upp utstötningarna från glaset.

5.1.5 Homogens skyddsmaterial – skyddsmekanismer i homogena material

Då det gäller penetration i homogena material gäller alltid att penetrationsdjupet ökar ju högre projektildensitet och spetsigare/slankare projektil som används eftersom rörelseenergin då koncentreras på en mindre yta.

Hur penetrationsprocessen går till i ett homogent material styrs av penetratorns hastighet v , penetrator- och skyddsmaterialens hållfasthet och densitet σ_{proj} , $\sigma_{\text{mål}}$, ρ_{proj} resp. $\rho_{\text{mål}}$, penetratorns form (tvärsnittsarea A_{proj} , spetsformens motståndskoefficient c_D , och slankhetstal L/D etc.) och anslagsytans lutning α . c_D är en formfaktor mindre än 1, som beskriver strömningsmotståndet från projektilspetsen, jämför luftmotståndskoefficienten vid luftströmning (se avsnitt 10.5).

Kontaktkrafterna mellan penetrator och mål kan delas upp i hållfasthetskrafter och tröghetskrafter $F = F_{\text{hållf}} + F_{\text{trög}}$. Hållfasthetskrafterna är de krafter som åtgår för att övervinna materialens inneboende styrka och tröghetskrafterna är de krafter som åtgår för att accelerera undan materialen. Om man statiskt pressar in en projektil i målet är tröghetskrafterna helt försumbara. Ökas hastigheten ökar tröghetskrafterna kvadratisk med hastigheten och har därför stor betydelse i många vapensammanhang. När hållfasthetskrafterna dominerar blir förhållandet mellan penetratorns och skyddets hållfasthet av avgörande betydelse. När däremot tröghetskrafterna dominerar är det materialens densitet som har den avgörande betydelsen. För vanliga vapenhastigheter måste man oftast ta hänsyn till båda krafttyperna. Friktionskrafterna mellan penetrator och hållkanal har däremot försumbar inverkan vid de hastigheter som är aktuella i vapensammanhang.

För att kunna beräkna en projektils penetrationsförmåga måste man känna till bromskraften på projektilen, hur projektilens deformerar och dess eventuella massförlust under penetrationen (till exempel genom erosion av pilprojektil). Penetrationsdjupet kan därefter bestämmas genom att integrera kraftekvationen $F = ma$, där F är bromskraften på projektilen, m projektilmassan och a projektilens retardation, dvs. andraderivatan av penetrationsdjupet.

Den totala bromskraften på projektilen kan uttryckas som summan av $F_{\text{hållf}} = k_1 \sigma_{\text{mål}} A_{\text{proj}}$ och $F_{\text{trög}} = 1/2 \cdot c_D \rho_{\text{mål}} v^2 A_{\text{proj}}$. Termen $k_1 \sigma_{\text{mål}}$ är den spänning som krävs för att fördjupa penetrationskanalen där faktorn k_1 är av storleksordningen 4-5.

Om projektilen betraktas som stel, dvs. har så hög hållfasthet att den inte deformerar vid anslag och inträngning i målet, är A_{proj} , m_{proj} och c_D konstanter och penetrationsdjupet P kan direkt integreras ur kraftekvationen.

$$P = \iint \frac{F_{\text{hållf}} + F_{\text{trög}}}{m_{\text{proj}}} dt dt = \iint \frac{1}{m_{\text{proj}}} (k_1 \sigma_{\text{mål}} A_{\text{proj}} + \frac{1}{2} c_D \rho_{\text{mål}} v^2 A_{\text{proj}}) dt dt =$$

$$\frac{m_{\text{proj}}}{c_D \rho_{\text{mål}} A_{\text{proj}}} \ln \left(1 + \frac{c_D \rho_{\text{mål}} v^2}{2 k_1 \sigma_{\text{mål}}} \right)$$

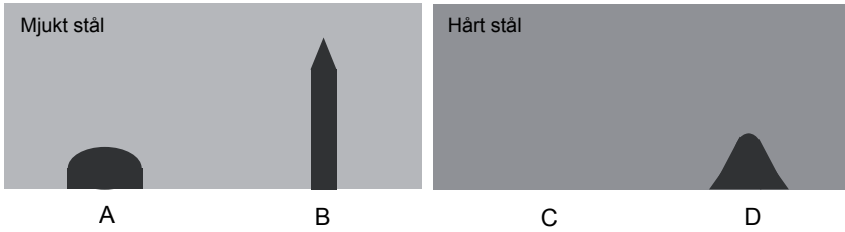
Om bromskraften är konstant, dvs. om tröghetskrafternas inflytande kan försummas, förenklas uttrycket till

$$P = \frac{m_{\text{proj}} v^2}{2 k_1 \sigma_{\text{mål}} A_{\text{proj}}}$$

I de flesta fall deformeras dock projektilen och denna deformation beror av bromskraften. $F_{A_{\text{proj}}}$ och c_D blir alltså inbördes beroende storheter varför man måste ansätta något uttryck för hur dessa storheter varierar. Ett flertal mer eller mindre komplicerade sådana ansatser finns i litteraturen. Enkla ansatser kan leda till slutna analytiska lösningar men vanligen måste ekvationerna lösas numeriskt.

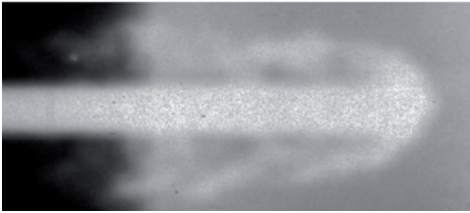
Vid de hastigheter som är intressanta för finkalibriga projektiler, ca 500-1000 m/s, är *hållfasthetskrafterna* avsevärt större än tröghetskrafterna varför penetrations-förloppet huvudsakligen beror på förhållandet mellan projektilens och skyddets hållfasthet. Oftast deformeras projektilen då den bromsas i målet och får en för penetration ogynnsam form. Under vissa förhållanden, nämligen då $\sigma_{\text{proj}} > k_1 \sigma_{\text{mål}}$, penetrerar projektilen utan att deformeras (stelkropps-penetration) varvid penetrationsdjupet blir väsentligt större.

Hållfasthetens stora betydelse för penetrationsprocesser i detta hastighetsområde illustreras nedan. Den vänstra delen av *Figur 5.7*. visar hållkanalerna efter att en bly- resp. stålprojektil trängt in i relativt mjukt stål. Blyprojektilens hållfasthet var betydligt lägre än stålprojektilens varför den deformeras till en svampform. Blyprojektilen stoppas därför efter en kort sträcka i jämförelse med den odeformerade stålprojektilen. Till höger visas hur samma projektiler påverkas av att målmaterialets hållfasthet höjs. Målmaterialet är i detta fall ett hårt pansarstål och blyprojektilen har flutit ut på ytan av målet medan stålprojektilen fortfarande kan penetrera men deformeras med minskat inträngningsdjup som följd. Projektilerna hade ursprungligen samma form och hastighet i alla fyra fallen.



Figur 5.7. Jämförelse mellan inträngningsförmågan för projektiler med olika hållfasthet i målmaterial med olika hållfasthet. Till vänster: Hålprofiler efter anslag av blyprojektil (A) resp. stålprojektil (B) i mjukt stål. Till höger: Hålprofiler efter anslag av blyprojektil (C inget hål) resp. stålprojektil (D) i hårt stål. (Källa: FOI)

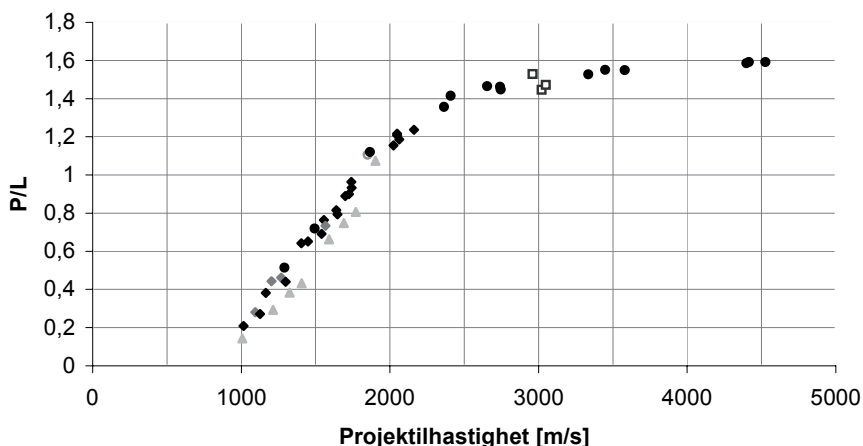
Ökar hastigheten till de hastigheter som gäller för mellan- och grovkalibriga projektiler, 1 000-2 000 m/s, ökar *tröghetskrafternas* betydelse. Detta innebär att kontaktkrafterna ökar så mycket att normalt både projektil- och målmaterial lokalt trycks ut åt sidan av den framrusande projektilen. De bakre delarna av projektilen hinner endast påverkas måttligt av vad som händer i spetsen och fortsätter att mata in projektilmaterial i målet med i stort sett oförändrad hastighet.



Figur 5.8. Genomlysningssbild (röntgenblixtrregistrering) av pilprojektils penetration i homogent material. (Källa: FOI)

I detta hastighetsintervall har hållfastetskrafterna fortfarande inflytande på penetrationsprocessen. Högre hållfasthet hos målet innebär att det blir svårare att trycka undan målmaterial varvid projektilspetsen konsumeras effektivare och skyddsförmågan ökar. Om man vill öka projektilens penetrationsförmåga är det på grund av tröghetskrafternas betydelse effektivare att höja projektilmaterialens densitet än dess hållfasthet. Vid 1500 m/s innebär en fördubbling av projektilmaterialens densitet med bibehållen massa hos projektilen (mindre projektil) att penetrationsförmågan i homogent pansarstål fördubblas (jämförelse mellan stålprojektil och tungmetallprojektil). En fördubbling av tungmetallprojektilens hållfasthet ökar dock inte penetrationsförmågan. Fördubblar man målmaterialens hållfasthet (hårdare stål) ökar däremot skyddsförmågan med ca 30 %. Det bör dock påpekas att även projektilmaterialens hållfasthet är av betydelse vid penetration av skydds-konstruktioner som bygger på geometriska störningar.

Inverkan av projektilhastigheten framgår av *Figur 5.9* som visar penetrationsförmågan för pilprojektiler av tungmetall i pansarstål. Penetrationsförmågan ökar ungefär linjärt med ökande projektilhastighet vid normala vapenhastigheter (1 000-2 000 m/s). Vid hastigheter upp emot 2 500 m/s börjar dock kurvan plana ut, och över 3 000 m/s lönar det sig inte att öka hastigheten mer. Det penetrationsdjup som erhålls vid dessa höga hastigheter beror enbart på projektilens längd. Projektilen konsumeras i målet och då den tar slut upphör penetrationen. Vid de lägre hastigheterna har målmaterialets hållfasthet fortfarande betydelse och håller emot med mindre penetrationsdjup som följd.



Figur 5.9. Normerat penetrationsdjup, P/L (penetrationsdjup/penetratorns längd) som funktion av hastighet för pilprojektiler av tungmetall i pansarstål. (Källa: FOI)

Vid riktigt höga hastigheter, ca 3 000 m/s och uppåt har alltså materialens hållfasthet ingen betydelse. Det är istället *tröghetskrafterna* som styr förloppet varför de enda materialegenskaper som inverkar är densiteten hos projektil- och skyddsmaterialen. Penetrationsprocessen påminner om vad som händer då en vattenstråle penetrerar lera. Matematiskt kan detta beskrivas genom tryckjämvikten i gränssytan mellan projektil och mål

$$\rho_{\text{proj}}(v-u)^2 = \rho_{\text{mål}}u^2$$

där v är penetratorns hastighet och u gränssytans hastighet. Dessa båda hastigheter är i dessa förlopp olika eftersom penetratorn konsumeras i målet, dvs. penetratormaterial matas in med högre hastighet än den hastighet med vilken penetrationskanalen fördjupas. Antagandet att penetrationen upphör då hela projektilen konsumerats ger vid konstant hålbotten- och projektilhastighet pe-

netrationstiden $t_I=L/(v-u)$, där L är penetratorns längd. Penetrationsdjupet blir då $P=ut_I$ vilket med tryckjämnviktsekvationen ovan ger

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_{\text{proj}}}{\rho_{\text{mål}}}}$$

RSV-strålars och mycket snabba pilprojektilers höga penetrationsförmåga beror alltså främst på penetratorns stora längd. Ju högre densitet penetratorn har och ju lägre densitet målet har desto större penetration erhålls. En slutsats av detta beträffande skydd mot RSV-strålar (och mycket snabba pilprojektiler) skulle kunna vara att skyddsmaterial bör ha hög densitet. Detta gäller dock endast då vi talar om penetrationsdjup, inte vikt på skyddet. Vid betraktande av erforderlig ytvikt D_m (vikt per areaenhet) hos skyddet $D_m = \rho_{\text{mål}} P = L \sqrt{\rho_{\text{proj}} \rho_{\text{mål}}}$ ser man att målets densitet bör hållas så låg som möjligt för att ge god viktsskyddsförmåga.

Målmaterialets hållfasthet har dock indirekt betydelse för RSV-strålars möjligheter att penetrera målet eftersom högre hållfasthet ger en smalare penetrationskanal, vilket i sin tur innebär att de bakre delarna av den vanligen inte helt raka strålen kan få svårt att ostörda nå ner till botten av hålkanalen.

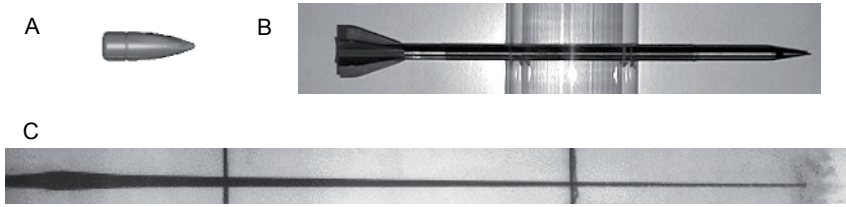
Vid extremt höga hastigheter, ca 10 000 m/s, tillkommer termodynamiska effekter som till exempel förångning. I stridsdelssammanhang förekommer inte så höga hastigheter förutom hos spetsfragmenten på en RSV-stråle. *Tabell 5.3* sammanfattar hur penetratorhastigheten påverkar responsen hos de höghållfasta metalliska material som normalt används som skyddsmaterial. De skuggade raderna gäller vapenområdet.

Tabell 5.3. Sammanfattning av hur penetratorhastigheten påverkar respon-
sen hos de höghållfasta metalliska material som normalt används som
skyddsmaterial

| Anslagshastighet | Töjnings- hastighet | Beteende | Tillämpning |
|------------------|------------------------|---|--|
| >10 000 m/s | 10^8 | Explosivt anslag, förångning av materialet | Rymdfragment Ballistiska robotar |
| 2 000-10 000 m/s | 10^7 | Hydrodynamiskt förlopp (vätskebeteende) Densitets- inflytandet dominerar | RSV-strålar, Framtida KE-projek- tiler |
| 1 000-2 000 m/s | 10^5 | Stora plastiska deformatio- ner, konsumtion Både hållfasthet och densitet inverkar | Pilprojektiler |
| 500-1 000 m/s | 10^4 | Stora plastiska deformatio- ner, Hållfasthetsinflytandet dominerar | Finkalibriga projektiler Splitter |
| 50-500 m/s | 10^2 | Plastiskt beteende | Dynamiska material- provningmetoder |
| <50 m/s | 10^0 | Primärt elastiskt beteende | Materialprovning- metoder |

Vid låga hastigheter där hållfasthetskrafterna har stor betydelse och penetra-
torn i bästa fall (ur penetratorns synvinkel) kan penetrera som en stel kropp, bör
penetratorns geometri utformas så att den på bästa sätt kan trycka undan skydds-
materialet och hålla för de belastningar som uppstår vid anslag mot skyddet.
De fullkalibriga, rotationsstabiliserade finkalibriga projektilerna har på grund
av detta och kravet på lågt luftmotstånd oftast en oöval spetsform.

Vid högre hastigheter, då tröghetskrafterna dominerar alltmer, konsumeras
penetratorn i stället för att bromsas in och måste då ha en tillräcklig absolut-
längd för att komma igenom pansaret. Projektiler som skjuts med eldrörsvapen
av större kaliber är därför ofta utformade som långa och slanka pilar med slank-
hetstal upp mot $L/D=40$, se *Figur 5.10*. Den mest extrema varianten på detta är
RSV-strålen som är mycket lång och tunn (längd av storleksordningen metern,
diameter av storleksordningen millimeter).

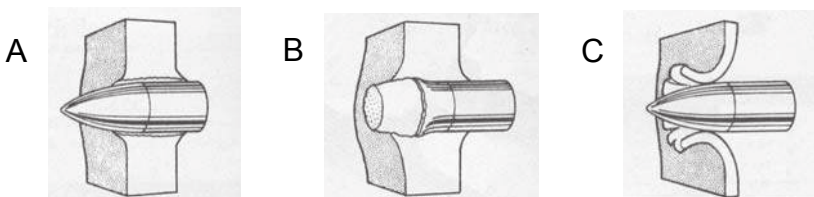


Figur 5.10. Exempel på olika penetratorgeometrier. (a) Finkalibrig projektil, hastighet ca 800 m/s, (b) Pilprojektil, hastighet ca 1800 m/s, (c) RSV-stråle, hastighetsfördelning ca 10000 m/s i spetsen och ca 3000 m/s i den bakre delen. (Källa: FOI)

Penetratorers genomträngning av ett materialskikt kan principiellt uppdelas i tre faser: anslag och begynnande inträngning, homogen inträngning under uppbromsning eller konsumtion respektive genombrott med splitterbildning.

Vid den första och sista fasen påverkar ytorna förloppet starkt. Inne i målet nära ytan påverkas penetrationsförloppet också av ytan genom att uppkommande spänningstillstånd avlastas genom deformation av ytan. Detta kallas för *randstörning*. En grov tumregel är att det randstörda områdets tjocklek är ca en projektildiameter. Skydd avsedda mot splitter och finkalibriga projektiler är ofta så tunna att randeffekterna vid anslag mot och utträde ur plåten har dominerande betydelse. För tjocka pansar avsedda att stoppa pilprojektiler och RSV-strålar påverkar ytorna förloppet endast under en liten del av penetrationen. Den homogena inträngningen dominerar förloppet i dessa fall.

Förutom förhållandet mellan projektil- och målmaterialens hållfasthet och projektilhastigheten påverkar alltså förhållandet projektildiameter - plåttjocklek penetrationsmekanismerna för finkalibriga projektiler. Allt från deformation i kontaktytan, lokal utstansning till mer global utböjning förekommer. Den deformationsmekanism som är minst energikrävande inträffar.

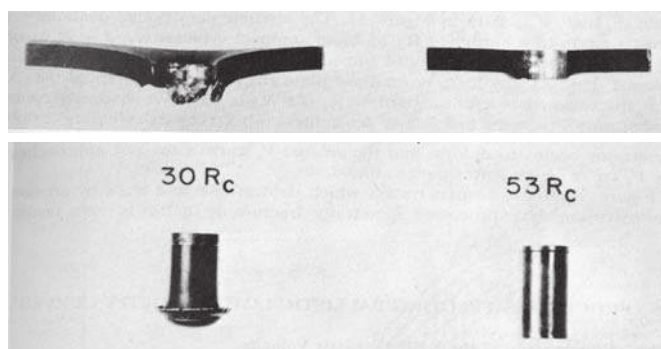


Figur 5.11. Några huvudtyper av penetrationsförlopp i metalliska material. (a) i huvudsak radiell flytning av målmaterial, (b) pluggbildning och (c) uppfläkning. (Källa: FOI)

För duktila målmaterial ser penetrationsförloppet ut som i *Figur 5.11a*. En i huvudsak radiell flytning av målmaterial ger upphov till hålskanalen. Om målmaterial är skjuvbrottbenäget underlättas pluggbildning varvid en del av målplåten kastas ut framför projektilen enligt *Figur 5.11b*. Vid tunna plåtar, tjocklekar mindre än projektildiametern, krävs mindre energi för att böja och

sträcka plåten än för radiell undanträngning av materialet. Om plåten är duktil erhålls ett principiellt beteende enligt *Figur 5.11c*. För sprödare material spricker plåten dessutom upp med stor uppflekning som följd. För skjuvbrottbenägna material sker fortfarande pluggbildning i den tunna plåten men pluggens diameter blir mindre än projektildiametern.

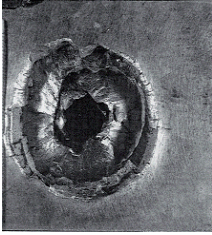
Projektildformationen påverkar också vad som händer i tunna plåtar. *Figur 5.12* visar hur en deformerande projektil ger en mjukare, mer utspridd belastning med utbuktning, kragbildning och uppflekning av plåten till följd, medan den hårdare kantiga projektilen förorsakar pluggbildning i plåten vilket konsumerar betydligt mindre energi. Projektilerna och målen i bilden var ursprungligen identiska så när som på projektilens hårdhet. Gränshastigheten för genomslag blir på grund av skillnaderna i penetrationsmekanismer betydligt lägre i fallet med den hårda odeformerade projektilen.



Figur 5.12. Penetration av en tunn plåt. Till vänster för en deformerande projektil, till höger för en stel projektil. (Källa: FOI)

Alla möjliga mellanting av dessa principuppträdanden förekommer. Exempelvis är det vanligt att pluggbildning initieras genom adiabatisk skjuvning men att den sker asymmetriskt så att ena sida skjuvas av medan andra sidan böjs och bryts av.

Även för tjocka plåtar mot grövre projektiler kan den bakre randen påverka skyddsförmågan. Detta gäller speciellt spröda målmaterial där stora sjok av målmaterial kan lossna och kastas ut (utstötning) innan projektilen når fram. *Figur 5.13* visar baksidan av en titanplåt där ett område med betydligt större diameter än hållkanalen stötts ut. Det utstötta materialet bildar sekundärsplitter bakom skyddet.



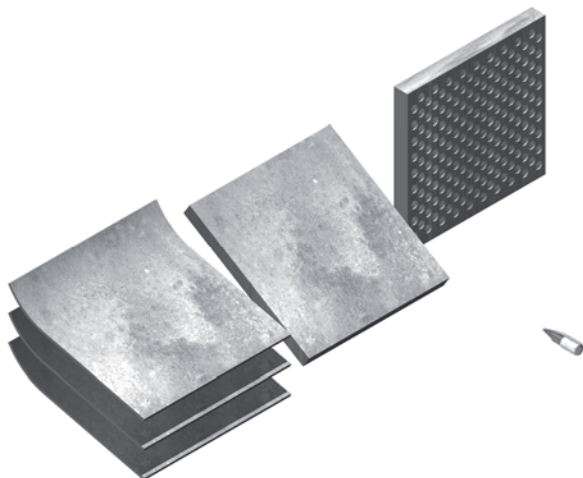
Figur 5.13. Utstötningseffekter på baksidan av en titanplåt. (Källa: FOI)

En annan viktig randparameter är plåtens lutningsvinkel. Om plåten lutar fås förutom bromskraften på projektilen även tvärkrafter som kan deformera projektilen vid anslaget och snedställa, kröka och fragmentera projektilen vid utträdet av plåten. För stora vinklar kan avglidning/rikoschett i stället för penetration inträffa. Vid penetration av tjocka plåtar kan projektilens gångväg genom plåten påverkas då projektilen går den väg som ger minst motstånd. Detta innebär att projektilen avlänkas mot den närmaste randen och får en S-formad bana genom plåten.

På- och avlastningarna som sker vid ytorna kan många gånger vara effektiva för att störa och slå sönder penetratorn. Ett alternativt sätt att förbättra skyddet kan därför, under vissa förhållanden, vara att skicka pansaret istället för att öka dess tjocklek. Speciellt effektivt är detta vid spröda projektilmaterial.

5.1.6 Statiska geometriska skydd

Geometriska utformningar, som överför snedkrafter på penetratorn innan denna träffar huvudpansaret, är viktseffektiva sätt att åstadkomma hög skyddsförmåga. Dessa komponenter kan utformas på ett oräkneligt antal sätt. Geometriska störkomponenter blir mer viktseffektiva ju längre avståndet till huvudpansaret är. De avstånd som väljs blir en avvägning mellan skydds krav och volyms- och hanteringskrav. *Figur 5.14* illustrerar några exempel på statiska geometriska skydd: skiktat pansar, snedställd plåt och hålpansar.



Figur 5.14. Exempel på olika statiska skydd. Från vänster till höger: skiktat pansar, snedställd plåt, hålpansar. (Källa: FOI)

- Skiktat pansar

Med skiktat pansar ("spaced armour") avses två eller flera pansarplåtar med luftspalter emellan. När man skjuter en projektil mot ett skiktat pansar kan den första plåten ge krossning, sönderslagning, böjning eller snedställning av projektilen. Luftspalten gör att projektildelarna kan spridas ut och snedställningar kan utvecklas, varvid penetrationsförmågan i efterföljande plåt(ar) nedgår. För att ett skiktat pansar ska ge bättre skyddsförmåga än ett homogent krävs att störplåtarna är sådana att snedställningseffekter enligt ovan uppstår. I annat fall ger ett skiktat pansar sämre skydd än ett homogent eftersom avlastningen från det större antalet ytor försvagar pansaret.

Mot RSV-stridsdelar ger ett skiktat, vinklat stålpannar med flera plåtar ett förbättrat skydd jämfört med homogent stålpannar. Avlastningen på plåtarnas fram- och bakyta gör att hålskanalen blir något S-formad så att hålrean i strålens riktning blir mindre. Om avståndet mellan plåtarna är stort hamnar man på den avtagande delen av stand-off-kurvan för RSV-stridsdelen vilket gör att skyddsförmågan kan öka ordentligt.

- Hålpansar

Hålpansar exemplifierar den typ av skyddsmodul som bygger på att projektilen påverkas av att dess spets träffar en kant. Ett hålpansar är en plåt med ett stort antal hål utspridda över hela ytan. När projektilen träffar osymmetriskt i ett hål i plåten utsätts den för snedkrafter vilket får den att tumla alternativt slås

sönder. En sådan plåt på ett visst avstånd framför grundpansaret kan minska projektilens penetrationsförmåga avsevärt. Hålstorleken är dock kraftigt hotberoende och måste anpassas efter projektilkalibern. Hålpansar förekommer på lätta stridsfordon som skydd mot pansarprojektiler av mindre kalibrar. Samma typ av effekt kan erhållas om man istället för hål har fyllkroppar av material med annan densitet än grundplåten.

- Yttre skydd

Med yttre skydd avses en anordning (till exempel plåt, nät, stänger) som anbringas 1-2 m från huvudpansaret och vars främsta uppgift är att utlösa RSV-laddningar innan de träffar målet. Det yttre skyddet bör ha så stort avstånd till huvudpansaret att RSV-fragmenten börjar tumla och avvika från symmetriaxeln, det vill säga standoff-kurvan ska ha hunnit sjunka ordentligt. För moderna stora missilstridsdelar blir detta avstånd stort. Om det yttre skyddet görs kraftigt kan även pansarprojektiler påverkas av snedbelastningar på samma sätt som vid ett hålpansar eller skittat pansar.

- Skyddsmekanismer i geometriska skydd

Geometriska utformningar kan användas för att överföra snedkrafter på projektilen. Dessa snedkrafter resulterar i att penetratorn snedställs vilket i sin tur medför att penetrationsförmågan i efterföljande huvudpansar nedgår kraftigt. Är snedkrafterna tillräckligt stora kan penetratorn förutom att snedställas även deformerar och/eller slås sönder vilket ytterligare nedsätter penetrationsförmågan.

Stationära geometriska skydd (yttre skydd, kanter, galler etc.) överför vid ränderna också snedkrafter på penetratorns spets till följd av stängernas och hålens kanter resp. plåtens lutning, då skyddskomponenten penetreras.

För att de störningar som överförts från skyddskomponenten till penetratorn ska hinna utveckla stora snedställningar alternativt utspridning av projektil- eller strålfragmenten över en större yta av målet krävs ett visst avstånd till huvudpansaret.

De parametrar som är väsentliga för hur snedkrafter påverkar en penetrator är skyddskomponentens geometri (plåtens tjocklek och lutningsvinkel, hålens diameter och centrumavstånd etc.) och materialegenskaper samt penetratorns form, hastighet och materialegenskaper.

Störningarna till följd av snedkrafterna blir mer dominerande för en finkalibrig projektil än för pilprojektiler och RSV-strålar. Pilprojektilens och RSV-strålens längd och höga hastighet gör att störkomponenten endast påverkar en liten del av penetratorns längd. För den finkalibriga projektilen utgör däremot spetsen en stor del av projektilens totala längd.

5.1.7 Dynamiska geometriska skydd

Med dynamiska geometriska skydd avses ett pansar där delar av pansaret reagerar genom att sätta sig i rörelse vid träff av penetratorn alternativt med sensorer. Denna typ av skydd är inte så lämpad för lättare hot som fin- och mindre melnkalibriga projektiler eftersom dessa ofta skjuts i salvor varvid en stor del av skyddet förbrukas.

Ett *reaktivt pansar* är ett pansar bestående av två plåtar med något ”aktivt ämne” emellan som sätter plåtarna i rörelse då pansaret träffas. I den klassiska typen av reaktivt pansar används explosivämne som initieras av det tryck som uppstår då penetratorn träffar pansaret. Oftast orienteras pansaret i en relativt stor vinkel i förhållande till penetratorns rörelseriktning. Denna typ av pansar utvecklades först som skydd mot RSV-strålar och visade sig vara mycket effektivt mot dessa. Numera finns också tyngre varianter som är effektiva mot pansarbrytande projektiler.

När en RSV-stråle träffar det reaktiva pansaret kastas plåtarna in i strålens väg. RSV-strålen slår upp ett hål i plåten som är större än strålens diameter vilket gör att en efterföljande del av strålen får möjlighet att komma igenom. När plåten rört sig ytterligare kommer den åter i kontakt med RSV-strålen och kan konsumera ytterligare en del av denna. De delar av strålen som ej konsumeras i plåten blir mer eller mindre störda vilket även det medför nedsatt penetrationsförmåga.

När reaktivt pansar verkar mot projektiler kommer de inte, som i RSV-fallet, att konsumera mera av projektilen. I stället överför de flygande plåtarna snedkrafter på projektilen som om de är tillräckligt stora kan snedställa eller slå av projektilen. Projektilernas stora sammanhängande massa kräver betydligt tyngre plåtar i det reaktiva pansaret än i RSV-sammanhang.

Då rörliga komponenter ingår är det viktigt att komponenternas hastighet och geometri anpassas till penetratorns hastighet. I RSV-fallet måste plåtarna ha så hög hastighet att material matas in i strålens väg tillräckligt fort, annars slinker en stor del av strålens front (den verksammaste delen) igenom opåverkad. Samtidigt får hastigheten inte vara alltför hög. Interaktionen mellan stråle och plåt pågår då under en onödigt kort tid, bland annat på grund av att modulerna har en begränsad storlek, varvid en förhållandevis kort del av strålen konsumeras eller störs. Eftersom en projektil har betydligt lägre hastighet än en RSV-stråle skall plåtarna inte ges så hög hastighet i denna tillämpning, till exempel måste projektilen hinna ifatt den bakre plåten så att denna också kan påverka projektilen.

Det reaktiva pansaret ligger framför grundpansaret och skyddas normalt av en yttre plåt. Pansaret delas upp i ett antal moduler och bör utformas så att endast den modul som träffas av penetratorn aktiveras. På så sätt kan man und-

vika att hela skyddsobjektet riggas av vid första träffen och dessutom minska belastningen på skyddsobjektet när explosivämnet aktiveras.

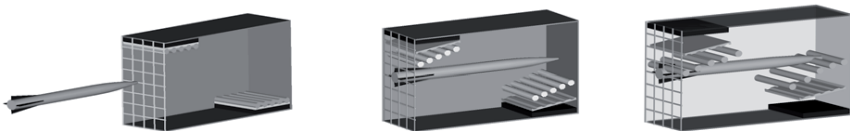
Den plåt som kastas mot penetratorn kan utgöra fara för egen trupp, och den plåt som kastas åt det andra hållet, kastas mot det egna skyddsobjektet. Grundskyddet bakom det reaktiva pansaret måste alltså kunna ta upp och dämpa ut denna belastning.

I så kallade milda reaktiva pansar används reaktiva ämnen som ger mindre våldsamma förlopp än explosivämne. I inert reaktivt pansar uppkommer en rörelse hos plåten med hjälp av icke-kompressibla material, t.ex. gummi, som expanderar då de utsätts för det stora trycket från penetratorn. Milda och inerta reaktiva pansar kan placeras långt inne i en skyddskonstruktion. Skyddsförmågan är dock lägre än för ett explosivt reaktivt pansar.

Eftersom RSV-strålens fragment är relativt lättstörda och det krävs att strålen är rak för att den ska fungera effektivt, är reaktivt pansar mycket effektivt mot RSV. Penetrationsförmågan sänks kraftigt eller kan helt raderas ut. De störningar som pansarprojektiler får av det reaktiva pansaret i form av snedställningar, sönderslagningar etc. gör att deras penetrationsförmåga i bakomliggande pansar går ner avsevärt.

Pansarprojektiler ger inte samma tryck i kollisionspunkten som en RSV-stråle (på grund av den lägre hastigheten) vilket gör det svårare att initiera sprängämnet vid träff. Valet av sprängämne blir därför svårare i denna tillämpning då sprängämnet måste vara tillräckligt känsligt för att initieras av pansarprojektiler men inte får initieras av effekter från träffar av splitter och finkalibriga projektiler. Alternativet är att använda ett okänsligt sprängämne och initiera detta med hjälp av ett separat sensor- och tändsystem.

En skyddsvariant som bygger på förinitiering av sprängämnet benämns ”smart armour”. Ett exempel på denna typ av skydd visas i *Figur 5.15*. Stänger monteras i en box och kastas mot projektilen då denna kortsluter ett triggaller eller påverkar en sensor. Genom att stängerna monteras asymmetriskt så att de kastas från ena sidan mot den främre halvan och från den andra sidan mot den bakre halvan av projektilen, kan stor sönderslagning och utspridning och av projektilen erhållas. Denna typ av pansar är särskilt effektiva mot projektiler med stort slankhetstal (långa och tunna projektiler).



Figur 5.15. Exempel på förinitierat närverkande dynamiskt skyddssystem. (Källa: FOI)

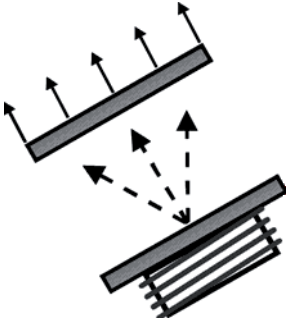
Ett *sensoraktiverat skydd* (SAS), ofta också kallat aktivt skydd, består av ett sensorsystem, någon form av utskjutningsanordning och en verkansdel. Skyddet erhåller med hjälp av en sensor förhandsinformation om inkommande hot och utlöser därefter automatiskt någon form av skyddsåtgärd. Skyddsåtgärden kan vara av så kallad ”soft kill”- eller ”hard kill”-typ. Soft-kill innebär t.ex. störning av målsökare och tändsystem, utskjutning av skyddsrok eller generering av skenmål, medan hard-kill innebär att det inkommande hotet rent mekaniskt störs eller förstörs.

Stora krav ställs på sensors och utskjutningsanordningens reaktionssnabbhet för att man ska hinna störa ut den annalkande stridsdelen. SAS-systemen kräver kunskap om bl.a. signalbehandling, banberäkning, hotsignatur och sensorsystemkrav, verkansmekanismer mot olika typer av hotstridsdelar och olika motmedelstyper.

RSV-stridsdelar är generellt sett relativt känsliga för mekanisk påverkan (t.ex. splitter) och ett antal SAS-system finns redan utvecklade för att möta dessa hot. Skydd mot grovkalibriga pilprojektiler är i de flesta avseenden en betydligt större utmaning än skydd mot RSV-hot, både för sensordelen (hög hastighet/låg signatur) och verkansdelen (mekanisk okänslighet). Man kan dock erhålla god skyddseffekt även mot KE-projektiler. Verkandelen i ett sådant system blir dock onödigt kraftfullt mot RSV-stridsdelar.

En stor skillnad mellan sensoraktiverade skydd, reaktiva och rent passiva skydd är att SAS kan skydda mer än sin uppvisade yta. Detta medför att ett fåtal moduler med relativt låg vikt och volym kan skydda stora ytor och genom överlappning av skyddssektorer även medge en god flerskottskapacitet.

Om systemen appliceras på väl skyddade fordon som t.ex. stridsvagnar kan skydd mot framtida, tyngre hot erhållas. På lättare plattformar som t.ex. lätta stridsfordon kan skydd mot hot som tidigare endast kunnat hanteras av tunga stridsvagnar erhållas. Störkomponenten i ett sensoraktiverat skydd kan också sättas i rörelse med annat än explosivämnen, till exempel med elektromagnetiska krafter. Ett sådant pansar kan vara uppbyggt av en elektrisk energikälla som urladdas genom spolar i fordonets chassi och i plåten på sådant sätt att repellerande elektromagnetiska krafter uppstår. Dessa krafter utnyttjas till att accelerera plåten.



Figur 5.16. Elektromagnetiskt accelererad plåt. (Källa: FOI)

Skyddseffekten från ett sådant pansar liknar den från den motflygande plåten i ett reaktivt pansar. En stor fördel är att man slipper de säkerhetsproblem som hör ihop med explosivämnen. Pansaret är inaktivt till dess att någon sensor kortsluter strömkretsen från aggregatet till spolarna.

Elektromagnetisk utkastning ökar också möjligheterna att styra utkastningsförloppet vad gäller såväl hastighet som riktning på plåten. Detta åstadkoms med hjälp av flera spolar hos vilka strömstyrkan kan varieras. Resultatet blir att större sektorer av vagnen kan skyddas med den enskilda skyddspanelen. Detta leder både till möjligheten att skydda sig med färre antal moduler.

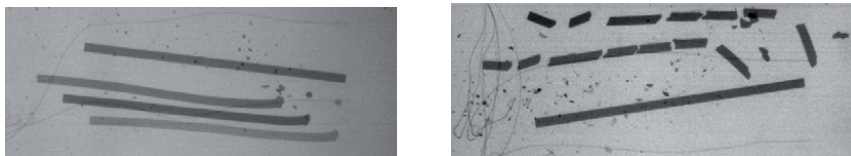
Eftersom den elektromagnetiska utskjutningen inte kräver heltäckande inneslutning såsom explosivämnet i reaktivt pansar, kan även andra geometrier än plåtar användas som rörlig komponent, till exempel galler och stänger. Efter som man får ett mindre våldsamt accelerationsförlopp än med explosivämnen kan även vekare geometrier skickas iväg utan att deformeras för mycket.

Dynamiska störkomponenter är effektiva mot de flesta typer av penetrerande stridsdelar. De allt strängare viktsskydds krav som gäller för rörliga skyddsobjekt gör att dynamiska skyddsvarianter blir en allt vanligare skyddslösning mot de tunga hoten RSV och pilprojektiler. Mot de lättare hoten räcker det oftast med stationära störkomponenter. Sådana projektiler är på grund av sin form (litet längdtröghetsmoment) tillräckligt lättstörda för att snedkrafter i spetsen ska räcka till för att snedställa dem.

Avsikten med *dynamiska skydd* (reaktivt pansar, sensoraktiverade skydd etc.) är, liksom för de statiska geometriska skydden, att överföra snedkrafter på penetratorerna. Skillnaden mellan statiska och dynamiska skydd i detta avseende är att de dynamiska skydden inte bara överför snedbelastningen via penetratorns spets utan dessutom längs med penetratorns längd.

Den glidande lasten ger olika effekt beroende på om det är en projektil eller en RSV-stråle som utsätts för den. Delar av den snabba och tunna RSV-strålen eroderas bort och andra delar blir kraftigt störda. *Figur 5.17* visar ett

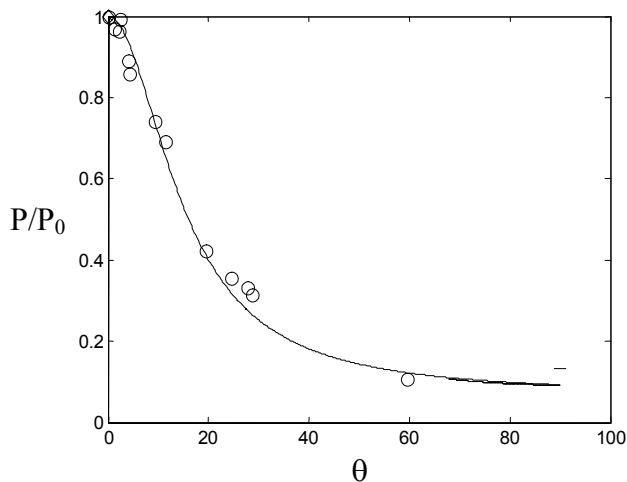
exempel på hur störd en RSV-stråle kan bli efter genomslag av ett reaktivt pansar.



Figur 5.17. Störning från reaktivt pansar på RSV-stråle. Till vänster träffar RSV-strålen den reaktiva panelen. Till höger ses resterna av strålen som passerat det reaktiva pansaret. (Källa: FOI)

Projektiler är väsentligt svårare att störa med denna typ av påverkan eftersom de har måttlig hastighet, hög hållfasthet och stort längdtröghetsmoment i jämförelse med RSV-strålar. Projektilerna kan snedställas, deformerats och fragmenteras så att restprojektilen lättare kan stoppas av grundpansaret.

Rörliga plåtar är rätt använda och dimensionerade, effektiva skyddskomponenter i dynamiska tilläggsskydd. Även om pilprojektilen bara ges en mindre snedställning nedsätter detta den fortsatta penetrationsförmågan avsevärt, se *Figur 5.18*.

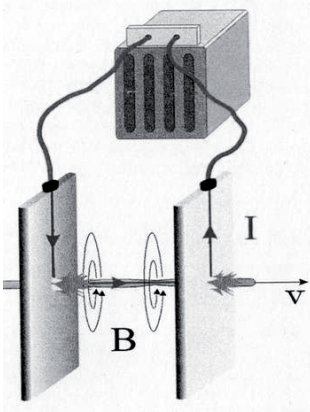


Figur 5.18. Hur penetrationsförmågan relativt en ostörd projektil ($L/D=20$) avtar i homogent pansarstål som funktion av projektilens snedställning. (Källa: FOI)

5.1.8 Elektriskt pansar

Med elektriskt pansar menas att elektriskt lagrad energi genom direkt elektrisk påverkan används för att störa det inkommande hotet så att dess förmåga att slå igenom huvudpansaret minskas. En typ av elektriskt pansar som anses ha poten-

tial att förverkligas i närtid bygger på att hotpenetratorn kortsluter en elektrisk krets så att en stark ström urladdas genom penetratorn enligt *Figur 5.19*.



Figur 5.19. Principiell uppbyggnad av elektriskt pansar. (Källa: FOI)

Denna typ av pansar har visat sig fungera effektivt mot RSV-strålar. Pansaret består av två plattor som laddas upp till en hög spänning och kortsluts av RSV-strålen då den passerar genom de två plattorna. En mycket stor ström rusar då genom strålen och påverkar den på olika sätt. Dels värms den upp till följd av resistiva förluster, vilket kan förändra de mekaniska egenskaperna hos penetratormaterialet. Bli strömmen tillräckligt hög kan materialet tänkas smälta eller förgasas. Inhomogeniteter i geometrin och materialet kan också ge lokaliserade effekter som lokal upphettning och förgasning. Vid den midjebildning som initierar fragmenteringen av strålen bildas magneto-instabiliteter som påskyndar den för penetrationsförmågan negativa fragmenteringen av strålen.

Genom att tillföra strömmen i ena kanten på plåtarna erhålls också asymmetri i magnetfältet som ger en reaktionskraft i strålen. Denna kraft kan translatera strålfragmenten i sidled under passagen genom plåten så att de snedställs eller böjs och avlänkas.

KE-projektiler är på grund av sin geometri, massa och hållfasthet betydligt svårare att störa ut med elektrisk energi.

Elektriskt pansar kommer sannolikt att användas som ett komplement till det konventionella ballistiska skyddet på framtida stridsfordon. Anledningen är att man kommer att få tillgång till stora mängder elektrisk energi i vagnarna (t.ex. för framdrivning och utskjutning). Denna utveckling drivs nu också av civila behov av alternativa energikällor och det finns redan system som har tillräckliga prestanda för att vara intressanta i pansarsammanhang.

Ett tvåplattorssystem där penetratorn kortsluter en strömkrets har redan visats fungera mot RSV-stridsdelar. T.ex. sägs det engelska lätta stridsfordonet

Warrior ha utrustats med ett sådant skydd som vid beskjutning med RPG-7 varvid det endast uppstod smärre märken i fordonets huvudpansar, dvs. hela stridsdelens penetrationsförmåga raderades ut. Endast kommersiellt tillgängliga elsystem uppges ha använts i detta fall.

Förutom som skydd mot direktverkande pv-vapen kan man också förvänta sig att denna typ av pansar kan komma till användning som takskydd i stridsfordon mot RSV-substridsdelar.

5.2 Skydd mot tryckverkande stridsdelar

Ballistiska skydd mot tryckverkande stridsdelar handlar framför allt om skydd för fartyg och minskydd i botten av fordon. Andra typer av tryckverkande stridsdelar klaras antingen av skyddet som redan finns mot penetrerande stridsdelar eller är så kraftiga att det inte går att åstadkomma skydd med annat än berggrum och dylikt (stora bomber och kärnvapen). I sammanhanget bör man också alltid tänka på att det uppstår en stötvåg, se avsnitt 4.1.8, i samband med tryckvågen, även verkan av denna stötvåg måste begränsas.

Fartygsskydd bygger på att man lokaliserar och tar hand om den uppkomna skadan. Stridsdelar som är aktuella mot fartyg kan normalt inte stoppas på utsidan av skyddsobjektet utan fartyget konstrueras så att det inte slås ut fullständigt genom sektionering och zonindelning samt systemreduktion. Den enda typ av fartyg som i någon mening kan sägas ha ett ballistiskt skydd som klarar torpeder och minor är ubåtar. De har ett starkt inre tryckskrov och i många fall ett yttre formskrov.

Skydd mot tryckverkande landminor bör dels dämpa ut stötvågen, dels avlänka den totala tryckbelastningen från minan. En stötvåg är den mycket branta, kortvariga tryckfront som momentan ändrar hastigheten på bottenplåten och överför mycket stor acceleration och kraft till objekt på andra sidan plåten. Denna stötvåg orsakar att personalen i vagnen får benen krossade om de har fötterna på golvet, och att lös materiel som ligger på golvet i vagnen kastas omkring och kan orsaka skador på personalen. Med ökad markfrigång och lämplig bottenutformning kan verkan av tryckverkande minor kraftigt reduceras. Många lätta fordon har numera ett kraftigt V-format underrede med tydligt frilagda hjul. Ofta används en yttre plåt med en viss distans till golvet. Dämpande infästningar respektive dämpmaterial i bottenplattan kan användas för att minska stötvågens effekter.

Inre konstruktionslösningar som förhindrar överföring av stötvågor till personal och materiel ger goda skyddseffekter. Stolar fästes i väggen, fötterna placeras på fotstöd som inte har direktkontakt med bottenplåten och all lös utrustning monteras i elastiska fästen med stor dämpning. Snarlika lösningar används på såväl mark- som sjöfarkoster (jfr avsnitt 14.3).

6. Elektromagnetiska stridsdelar och skydd mot dessa²⁵

Elektromagnetiska stridsdelar verkar genom att sända ut starka elektriska fält som i första hand stör ut elektronik och sensorer i moderna infrastrukturer och vapensystem. Med högre energi kan även förstörande verkan uppnås mot elektronik, trupp, stridsdelar och vapenbärare. Verkansområdena för HPM²⁶ och laser är normalt begränsade, medan EMP²⁷-pulsen från t.ex. en kärnladdning kan täcka stora delar av en kontinent.

6.1 Elektromagnetiska hot

Naturlig blyxt, nukleär EMP (NEMP) och HPM är allvarliga hot mot all oskyddad civil och militär elektronik och elektrisk utrustning.

Militära system har höga krav avseende tillförlitlighet och tillgänglighet. Moderna stridsflygplan och stridsfartyg har inom en begränsad volym ett stort antal avancerade elektroniska system, vilket gör den elektromagnetiska miljön särskilt komplicerad. En enda transient (kortvarig störpuls av tillräckligt stor amplitud) som induceras i kraftförsörjning eller datanät ombord på dessa plattformar kan med lätthet spridas till många system och orsaka funktionsstörning. Datorsystemen kan låsa sig och kräva omstart eller drabbas av permanenta skador på komponenter, vilket kan försätta plattformen ur stridbart skick.

Transienter definieras som en överspänning eller överström som har en varaktighet som är mycket kortare än perioden. Medvetenheten om det hot som

25. Se även ”*Elektromagnetiska vapen och skydd*” FOI orienterar om, nummer 1, 2001, ISBNBN 91-7056-104-4.

26. High Power Microwave.

27. ElektroMagnetisk Puls.

transienter utgör för civila och militära elektriska system har ökat främst av följande skäl:

1. Elektronik blir, bland annat p.g.a. miniatyriseringen, mer känslig
2. Känsliga system blir allt mer vanligt förekommande även i militära system p.g.a. nyttjande av COTS²⁸.
3. Kraftledningar används i den civila sektorn i ökande grad för överföring av signaler och data.
4. Naturliga störningars effekter på de av elkraft beroende samhällssystemen blir allt mer kända genom massmedias rapportering om bl. a. blixrens effekter på telesystem, datormodem, larmsystem och brandskyddssystem.
5. Avsiktliga störningar betraktas som ett allvarligt hot mot såväl samhällsviktiga civila som militära system.
6. Kunskapsspridning (bl.a. via Internet) om möjligheter att störa elektronik inspirerar teknikintresserade att bygga egna storkällor, t.ex. av en mikro-vågsugns komponenter

Tillförlitlig och avbrottsfri funktionalitet hos lednings-, kommunikations- och informationssystem på moderna stridsflygplan och stridsfartyg förutsätter:

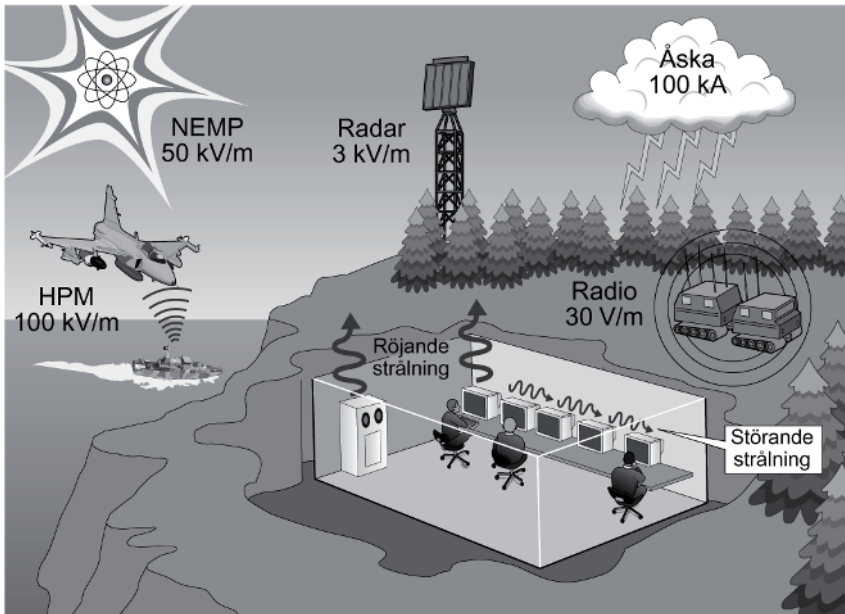
- Tillförlitlig kraftförsörjning
- Störningsfri överföring av digitala data inom och mellan systemen
- Driftsäkra och robusta delsystem som uppfyller internationella och nationella standarder för el-miljö

För att uppnå hög tillförlitlighet och tillgänglighet hos de elektroniska system som moderna stridsflygplan och stridsfartyg är beroende av för att kunna fullfölja sina operativa uppgifter förutsätts fullständig kontroll över den elektromagnetiska miljö de skall operera i. Åtgärder måste vidtas i syfte att undvika att ett taktiskt uppdrag måste avbrytas på grund av elektromagnetiska störningar från naturlig blix, Högeffekt Pulsad Mikrovågsstrålning (HPM), informationsoperationer eller telekrigsinsatser (elektronisk attack).

Den elektromagnetiska miljön för militära system består av:

28. COTS = Commercial off the shelf.

- Naturliga störningar från främst blix
- Elektrostatiska urladdningar (ESD)
- Avsiktliga störningar i form av nukleär elektromagnetisk puls (NEMP), effekter av telekrigföring såväl p.g.a. oavsiktlig störning av vänligt sinnade parter i en allians som från avsiktlig elektronisk attack från kontrahenter, samt från högeffekt pulsade mikrovågsvapen (HPM)
- Elektromagnetiska fält genererade av radar och radiosändare
- Elektromagnetisk interferens (EMI) från närbelägna system

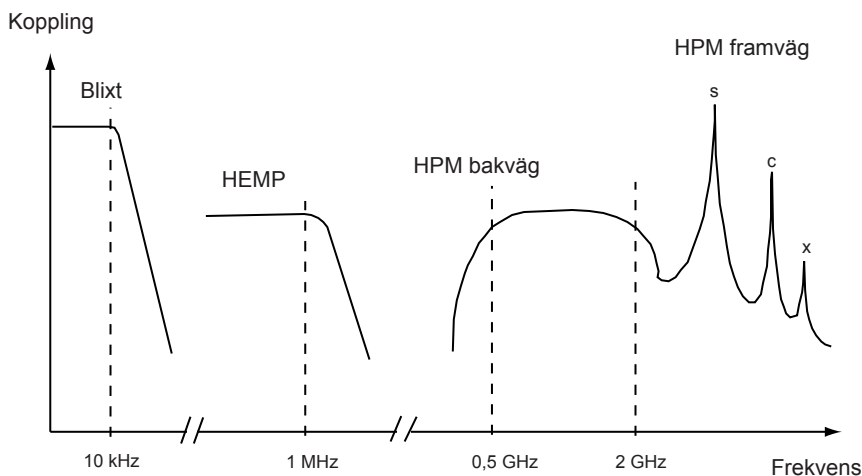


Figur 6.1. Den elektromagnetiska miljön för militära system, t.ex. en underjordisk ledningscentral i det framtida nätverksbaserade försvaret, består av naturliga källor som blix och elektrostatisk urladdning (ESD) och avsiktliga störningar i form av nukleär elektromagnetisk puls (NEMP), högeffekt pulsade mikrovågsvapen (HPM), telekrigföring samt Elektromagnetisk interferens (EMI). (Källa: FOI)

Moderna industrinationer är starkt beroende av datorsystem och infrastrukturella kommunikationssystem uppbyggda av halvledarkomponenter som är känsliga för transienter. Som en följd härav har den globala sårbarheten ökat mot attacker med vapen (t.ex. EMP- och HPM-vapen) som är konstruerade för att störa eller förstöra halvledarkomponenter i elektroniska system²⁹.

29. C. Kopp, "An Introduction to the Technical and Operational Aspects of the Electromagnetic Bomb", Journal of Electronic Defence, Supplement, ISSN 0192-492X, January 1997.

Det utspridda beroendet av elektriska och elektroniska system har lett till att kunskaper om elektromagnetisk förenlighet, EMC³⁰, har ökat i betydelse som en metod att reducera sårbarheten mot alla typer av hot i det elektromagnetiska spektrat, se Figur 6.1. Där visas kopplingen av elektromagnetiska transienter till ett godtyckligt oskyddat elektriskt system som funktion av frekvensen från några kHz (naturlig blix) till åtskilliga tiotals GHz (framvägskoppling av HPM strålning). Elektromagnetiska hot innefattar också elektromagnetisk puls (EMP) från kärnvapenexplosioner på hög höjd, HEMP, som hotmässigt tar över när blixthotets koppling faller av i diagrammet. HEMP är ett betydande hot mot elektronik upp till ca 1 MHz. Högre upp i frekvens, från 0,5-2 GHz, tar HPM bakvägskoppling över som dominerande hot med i stort sätt lika stark koppling över hela det frekvensbandet. Framvägskoppling via sensorernas antenner ger smalbandiga kopplingstoppar vid radarbanden S, C, X och Ku, vid vilka det dessutom finns en stark koppling från elektronisk attack i form av radarstörsändning. Ett hot från kommunikations-störsändning föreligger mot kommunikationsutrustning i dessas frekvensområden.



Figur 6.2. Det elektromagnetiska spektrat. (Källa: FOI)

Elektrisk utrustning testas med avseende på tålighet mot elektromagnetisk strålning i enlighet med internationella EMC-standarder för ledningsbunden (CE³¹) och strålad störning (RE³²) i ekofri³³ respektive modväxlande kammare³⁴ (MVK).

30. EMC från eng. Electro-Magnetic Compatibility.

31. CE = Conducted Emission.

32. RE = Radiated Emission.

33. Ekofri kammare (Eng. Anechoic Chamber, AC).

34. Modväxlande kammare (Eng. Reverberation Chamber, RC).

Elektriska ledare och utrustning (t.ex. antenner) placerad utanför plattformars metalliska hölje (flygplans- och fartygsskrov eller fordon) utsätts för infallande plana elektromagnetiska vågfronter. Kopplingsmätningar i ekofri kammare, som t.ex. finns på FOI i Linköping, simulerar planvågsbestrålning på ett relevant sätt.

Elektriska ledare och utrustning som är placerad innanför plattformsskrov, t.ex. i ett elapparat rum eller motsvarande, kommer på grund av strålad emission från annan elektrisk utrustning i närheten och reflektioner i väggar att utsättas för en elektromagnetisk miljö som överensstämmer med den statistiskt isotropa, (lika stark i alla infallsriktningar) miljön som kan återskapas i modväxlande kammare.

Civila och militära flyg- och mariningenjörer är särskilt intresserade av EMC-frågeställningar, eftersom flygande och sjögående plattformar har en stor mängd elektroniska system ombord. Särskilt av flygsäkerhets skäl är det väsentligt att tillförsäkra sig att de elektroniska systemen för styr- och reglersystem, kommunikation och radar har en tillförlitlig och korrekt funktion i den elektromagnetiska miljön de förväntas operera i³⁵. Den elektromagnetiska miljön för elektriska system omfattar störningar genererade av människan och naturliga störningar.

6.1.1 Störningar genererade av människan

De huvudsakliga elektromagnetiska störningarna genererade av människan är radio och TV sändningar, radar, Nukleär ElektroMagnetisk Puls (NEMP) genererad av kärnvapenexplosioner på hög höjd, HPM-vapen, och elektronisk attack. Syftet med de tre senare är att begränsa eller förneka en motståndares användning av sensorer, lednings- kommunikations och informationssystem genom att elektronik i dessa störs eller förstörs. HPM kommer behandlas utförligt i avsnitt 6.2.

Vissa passiva eller aktiva elektromagnetiska karaktäristika som en plattform har kan vara av avgörande betydelse. Målets elektromagnetiska signatur (magnetisk, IR och radar) är det elektromagnetiska spektrum som utstrålas i olika frekvens eller våglängdsområden och som kan användas för klassificering och identifiering. En plattformars radarmålarea är ett mått på den elektromagnetiska energi som objektet reflekterar när det bestrålas av en radar. Denna reflekterade energi avslöjar målets läge och kan även nyttjas för att klassificera eller identifiera målet.

35. David A. Fulghum, *UCAVs Also Tagged To Carry Energy Weapons*, Aviation Week & Space Technology, 8 juli, 2002.

6.1.2 Naturliga störningar

Naturlig blixtrisk betraktas som en av de allvarligaste och vanligaste naturliga källorna till elektromagnetisk störning³⁶. De stora elektriska strömmarna och spänningarna i samband med ett blixtnedslag riskerar att orsaka skador på ytstrukturen, orsaka brand och antända bränsle eller ammunition. Därutöver kan ett blixtnedslag skapa stora strömmar och spänningar i ytstrukturen vilka genom elektromagnetisk koppling kan överföras till elektriska ledare innanför skrovet och orsaka skador och störningar på elektriska och elektroniska system.

Blixten kan påverka bl. a. ett stridsfartygs lednings- kommunikations- och informations-system genom följande kopplingsvägar:

Blixtrömmen från ett direkt blixtnedslag som passerar fartygets blixtskyddssystem på väg mot jordpotential i havsvattnet skapar ett elektromagnetiskt fält runt blixtnedledaren. Detta fält kan *inducera* sekundära transienter i fartygets elkraftnät som har tillräckligt stor amplitud för att skada elektrisk utrustning eller orsaka driftstörningar.

Om fartygets blixtskyddssystem inte fungerar korrekt vid ett *direkt blixtnedslag* i fartyget kan blixtrömmen, eller del därav, komma in i fartygets elektriska nät och skada elnätet eller anslutna elektriska apparater och elektronik.

Blixtnedslag till mark³⁷ eller hav³⁸ på stort avstånd från fartyget eller blixtar mellan³⁹ eller inom moln⁴⁰ skapar en elektromagnetisk puls som på flera tiotals kilometers avstånd kan *inducera transienter* i fartygets elektriska nät som kan störa eller förstöra elektroniken ombord.

Direkta blixtnedslag kan orsaka *ledningsbundna transienter* i markbundna elektriska nät som då fartyget är anslutet till landkraft i hamn eller bas kan ledas in i fartygets nät genom landkraft- eller telefonanslutning och orsaka skador på elektriska system ombord.

Det kan förefalla vara osannolikt att våra stridsfartyg som konstrueras för att kunna fungera med hög tillförlitlighet i en elektromagnetisk miljö där hotet från bland annat nukleär elektromagnetisk puls beaktats skulle vara känsliga för naturlig blixtrisk. Emellertid är verkligheten en annan. Nedan redogörs för två exempel på effekter av naturlig blixtrisk.

1992 rapporterades blixtnedslag på stort avstånd från ett antal robotbåtar i hamn. Transienter som inducerats i landkraftsystemet leddes uppenbarligen via landkraftanslutningen in i robotbåtarnas elnät. Besättningen på flera av båtarna rapporterade att fartygsbelysningen pulserade med ett intensivt ljussken

36. David A. Fulghum, *U.S. Funds British Energy Weapon Tests*, Aviation Week & Space Technology, 16 september, 2002.

37. Eng. Cloud-to-ground flash (CG).

38. Eng. Cloud-to-sea flash (CS).

39. Eng. Cloud-to-cloud flash (CC).

40. Eng. Intra-cloud flash (CC).

i samband med åskvädret. Dagen efter framkom att ett visst stridsviktigt sensorsystem inte fungerade på flera av robotbåtarna som var förtöjda vid samma pir. Efter felsökning kunde konstateras att det på samtliga av dess fartyg var ett nätfiler på växelströmsförsörjningen av sensorsystemet som skadats av en ledningsbunden transient. Sådan låg elektromagnetisk immunitet (motståndsförmåga) kan inte accepteras för stridsviktig utrustning på ett stridsfartyg.

Vid ett senare tillfälle, år 1994, slog blixten ned i kortvågsantennen på ett minjaktfartyg som låg förtöjt i hamn. Genom att granska data i det svenska blixtdetektorsystemet vid institutionen för elektricitetslära och åskforskning vid Uppsala Universitet, kunde man konstatera att ett 20 tal blixtnedslag registrerats i närheten av minjaktfartyget vid aktuell tidpunkt. I samarbete med Karlskronavarvet kunde exakt tidpunkt för blixtnedslaget i fartyget fastställas vilket ledde till slutsatsen att var ett negativt blixtnedslag med en blixtröm på 19,6 kA och en multiplicitet av 2, som med största sannolikhet slagit ned i kortvågsantennen.

Blixtnedslaget ägde rum när fartyget låg förtöjt i hamn och ledningssystemet inte var i drift. Det orsakade skador på kortvågsmottagaren, brandskyddssystemet, sonaren, obemannade undervattensfarkosten, internkommunikationen, orderanläggningen, dopplerloggen, ekolodet, FM radiomottagaren, VHF-radion, reservmanövrerings-systemet och skeppsövervakningssystemet.

Den tekniska undersökningen visade att tre typer av utrustningar var de som drabbats mest av blixtnedslaget:

- Utrustning som var ansluten till fartygets botten
- Utrustning och system som var placerade nära fartygets botten
- System med en utbredning över större delen av fartyget, t.ex. det interna kommunikationssystemet

Felfunktionen hos de ovan listade systemen visade sig vid en närmare undersökning bero på skador i enskilda komponenter såsom dioder och transistorer, snarare än skador på större delsystem. Emellertid, kan det inte uteslutas att blixtrömmen på sin väg genom fartyget, genom det elektromagnetiska fält som då skapades, kan ha orsakat åldring av komponenter som kan ge sig tillkänna som svårförklariga fel lång tid efter blixtnedslaget.

Lyckligtvis inträffade detta blixtnedslag i fredstid och i hamn. Om blixtnedslaget istället träffat ett stridsfartyg under ett uppdrag fritt till sjöss i krig kan var och en inse de allvarliga konsekvenser det kunde ha fått. Ett korrekt installerat blixtskyddssystem i kombination med elmiljöåtgärder enligt vedertagen elektromagnetisk förenlighet (EMC) ger grundläggande förutsättningar för att undvika katastrofala följder av blixtnedslag.

6.2 Högeffekt pulsade mikrovågsvapen (HPM)

Det finns ingen generellt accepterad definition av en HPM-källa, men eftersom konventionella mikrovågskällor såsom radarsystem har pulseffekter i storleksordningen 100 MW, används ofta detta värde som den lägre gränsen för HPM-källor.

Försvarsmaktsstudien ”HPM – hot och möjlighet i NBF”⁴¹ definierade i sitt förslag till HPM-policy ett HPM-vapen enligt följande:

Med ”HPM-vapen” menas i denna policy ett vapen där man avsiktligt genererar elektromagnetisk strålning och där syftet är att bekämpa elektriska/elektroniska system. Typisk parameterrymd för HPM-vapen:

- Frekvens: 0,3 – 300 GHz
- Utstrålad effekt: upp till 10 GW
- Pulslängd: upp till 1 μ s
- Antal pulser: upp till 20
- Pulsrepetitionsfrekvens: upp till 1 kHz

Det huvudsakliga syftet med ett HPM-vapen är att störa eller förstöra elektroniska system. Även en kortvarig störning kan resultera i en långvarig felfunktion som kan kräva omstart av t.ex. en bil eller ett datorsystem. För stridsflygplan eller robotar kan ett dylikt funktionsbortfall få katastrofala konsekvenser. Oskyddad elektronik kan störas av den relativt svaga elektriska fältstyrkan på små avstånd till en mobiltelefon. En permanent skada uppnås när den absorberade energin är så stor att halvledarmaterial eller ledningsbanor på kretskort smälter sönder. För att nå denna effekt krävs normalt en relativt hög fältstyrka av en storleksordning som kan uppnås nära en stark radarsändare. HPM strålning består i normalfallet av en enkel puls eller ett pulståg. Om syftet är att orsaka en permanent skada på elektronik bör energin koncentreras till ett fåtal pulser. För att orsaka felfunktion hos utrustning är det ofta nödvändigt att ha en viss lägsta pulsrepetitionsfrekvens.

6.2.1 HPM-hot, nulägesbeskrivning och närmaste framtid

HPM-vapen är ännu inte teknologiskt mogna för användning på bred front under fältmässiga förhållanden, men det finns uppgifter om att HPM-teknologin

41. S. Silfverskiöld, et al., *Studien ATK 99064S HPM – hot och möjlighet i NBF*, Bilaga 1 till 12 860:77394, Försvarsmakten, 2003-12-01.

har tagit steget från att vara föremål enbart för laboratorieförsök till att testas på utvalda plattformar och i utvalda situationer.

Utveckling av basteknologierna för HPM-stridsdelar bedrivs på flera håll i världen. Ledande är USA, Storbritannien, Tyskland, Frankrike och Ryssland, men forskning och utveckling inom ”pulsad kraft” och/eller delteknologier för HPM pågår i flera länder, som Australien, Ukraina, Israel, Nederländerna, Sydkorea, Kina, Indien m.fl.

Rykten om att HPM-liknande vapen har testats vid internationella konflikter har cirkulerat i flera år. I en öppen NATO-rapport hävdas att ”US Air Force used EMP and HERF weapons successfully in 1991 against Iraqi radar installations, and in 1999 against Yugoslav electronic infrastructure”. De testade anordningarnas konstruktion eller mera detaljerade beskrivningar av verkan ges emellertid ej.

Den typ av HPM-vapen som bedöms ligga längst fram i utvecklingen är medelstora HPM-vapen avsedda för autonoma plattformar, som t.ex. kryssningsmissiler, robotar och UCAV:s⁴². Dessa kan innehålla antingen bredbandiga eller smalbandiga strålkällor med energiförsörjning från system för repetitiv pulsad kraft. I dessa fall är skyddet av den egna plattformen mot den genererade strålningen mindre viktigt. Sådana kringflygande HPM-vapen förmodas under ett uppdrag kunna attackera upp till 100 olika mål med upp till 1000 pulser mot varje⁴³. Pulslängden är några nanosekunder och toppeffekten i gigawattområdet medan verkansavstånden kan vara några hundra meter upp till några km.

Anordningar baserade på HPM-teknologier kan i närtid komma att användas som störsändare vid polisiära insatser eller terroristbekämpning. Det finns även prototyper framtagna för att monteras på polisbilar, som med dessa ska kunna stoppa bilar under biljakter⁴⁴.

Större HPM-system eller HPM-vapen på större plattformar, exempelvis större bemannade flygplan och stora fartyg, kommer troligen i ett senare skede, när man förbättrat självskyddet mot läckage av strålning i närområdet till källan. Ett koncept för att störa ut MANPADS⁴⁵ avfyra av terrorister mot flygplan nära en flygplats har tagits fram. Detta består av en flera kvadratmeter stor gruppantenn som följer roboten med sin strålningslob och stör ut elektroniken så att denna kraschar⁴⁶.

42. David A. Fulghum, *UCAVs Also Tagged To Carry Energy Weapons*, Aviation Week & Space Technology, 8 juli, 2002. David A. Fulghum, *U.S. Funds British Energy Weapon Tests*, Aviation Week & Space Technology, 16 september, 2002. David A. Fulghum, *USAF Acknowledges Beam Weapon Readiness*, Aviation Week & Space Technology, 4 oktober, 2002.

43. <http://eurekaerospace.com/hpems.php>

44. Håkan Andersson, *Hotbildstudie. Högeffekt Pulsad Mikrovågsstrålning (HPM)*, FOA-R--99-01244-612--SE, november 1999.

45. Man-portable Air-defense Systems.

46. David A. Fulghum, *Microwave Weapons Emerge*, Aviation Week & Space Technology, 13 June, 2005.

HPM- eller RF-ammunition i form av kompakta stridsdelar av granatstorlek ligger troligen än längre fram i tiden. Dessa har ingen eller reducerad förmåga till direktivitet, dvs. är troligen rundstrålande, har korta verkansavstånd (några tiotal meter) och kan förväntas generera en enstaka eller möjligen ett fåtal bredbandiga mikrovågspulser.

HPM-hotet mot vitala samhällsfunktioner är av stort intresse för Försvarsmakten sett i ett brett säkerhetsperspektiv. HPM kan tänkas nyttjas som sabotage- och terroristvapen mot elektronikbaserade vitala samhällssystem. Skälet till att använda HPM kan t.ex. vara politiskt eller ideologiskt betingat eller i utpressningssyfte, samtidigt som risken för upptäckt bedöms som relativt liten. Intressanta mål, vad gäller vitala samhällssystem, kan vara elförsörjning, telekommunikationer, radio/TV, trafikledning, civil trafikflygledning, finansiella tjänster, informations- och ledningssystem samt sjukhus⁴⁷.

6.2.2 HPM-källor

Kraftfulla HPM-källor är troliga främst vid högre konfliktnivåer eftersom det krävs stora materiella och ekonomiska resurser och stort kunnande för att realisera dem.

HPM-källor består i allmänhet av delsystem representerande fem generiska delteknologier:

1. Primär energikälla
2. Mellanlagring
3. Pulsformning
4. Strålkälla
5. Antenn

Den primära energikällan för ett HPM-vapen kan utgöras av exempelvis:

- kemisk energi (explosivämne, batteri)
- mekanisk energi (svänghjul)
- elektrisk energi (uppladdad kondensator)
- högspänningsaggregat

47. M. Bäckström, C. Frost och P. Ånäs, Förstudie rörande vitala samhällssystem motståndsförmåga mot elektromagnetisk strålning med hög intensitet (HPM), FOA-R--97-00538-612--SE.

I de fall den primära energin inte är elektrisk måste den konverteras till en eller flera elektriska spännings- eller strömpulser. Pulsformningen, som har till uppgift att komprimera energin till en kortare puls (typiskt några hundra nanosekunder) med hög toppeffekt (typiskt 0,1 - 10 GW), kan ske kapacitivt, induktivt eller genom switchning.

Strålkällan kan utgöras av en smalbandig vakuumkavitet (såsom gyrotron, magnetron, klystron, virkator, backvågoscillator eller MILO) en bredbandig källa⁴⁸ eller en källa som genererar en dämpad sinuspuls⁴⁹. Typiska pulslängder är i intervallet från 10 nanosekunder till några få mikrosekunder. För HPM-källor med mycket hög puls toppeffekt, i storleksordningen GW är pulsrepetitionsfrekvensen ofta mycket låg, endast ett fåtal tiotals Hz eller lägre. Denna typ av militära HPM-vapen är svåra att göra kompakta och har höga krav på kraftförsörjning varför sannolikheten är mindre att de kan komma att nyttjas av terrorister eller sabotörer.

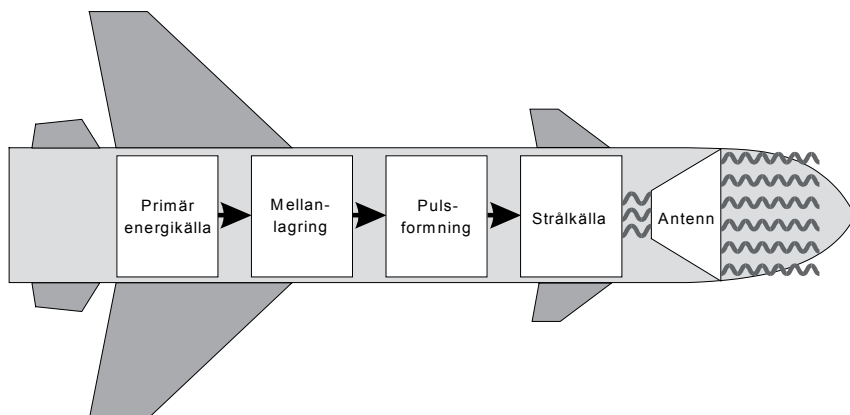
För sabotage eller terrorism kan istället kommersiellt tillgängliga radarkällor nyttjas i syfte att störa eller förstöra elektroniska system. I det fallet är det fråga om lägre pulseffekt, i storleksordningen MW eller lägre. Sådana mikrovågskällor kan å andra sidan ge en kontinuerlig strålning med hög pulsrepetitions frekvens, typiskt kHz, över en lång tidsperiod.

Storleken på dessa system har dock fördelen att ha en begränsad storlek och måttliga krav på kraftförsörjning att de kan placeras i en skåpbil eller i en större attachéväska. Kommersiellt tillgängliga bredbandiga HPM-störsändare saluförs av flera tillverkare och marknadsförs främst för nyttjande av militär och polis. Ett tänkbart scenario för en polisiär insats är att störa ut all kommunikation, TV-övervakning, inbrottslarm mm inför ett tillslag mot ett terroristnäste. Det kan dock inte uteslutas att denna typ av HPM-störsändare kan komma i terroristernas eller brottslingars händer.

Direktiviteten uppnås med en antenn. Parabolantenn, liknande de som nyttjas för radarsystem eller basstationer i mobiltelefonsystem, kan nyttjas. Den övre gränsen för den effekt som kan utstrålas från en antenn av given storlek ges av luftens genomslaghållfasthet, dvs. den HPM effekt som kan utsändas utan elektriskt överslag i luften, vilket förbrukar del av den tillgängliga pulsenergin. För att undvika överslag i luften, vid normalt tryck och temperatur, gäller för korta pulser, med en pulslängd i storleksordningen 1 mikrosekund, att pulseffekten inte får överstiga ca 10 GW/m².

48. C.E. Baum et al., JOLT: *A Highly Directive, Very Intensive, Impulse-Like Radiator*, Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 7, July 2004.

49. <http://www.diehl-bgt-defence.de/index.php?id=571&L=1>



Figur 6.3. Delteknologier vad gäller HPM-vapen. (Källa: FOI)

6.2.3 HPM-vapen

Vapen som utnyttjar HPM-strålning i syfte att störa eller förstöra elektronik kallas HPM-vapen. Dessa kan vara stationära eller större mobila system, mindre system med hög kompakthet (såsom HPM-granater eller substridsdelar i robotar) eller HPM-vapen med låg pulsrepetitionsfrekvens.

- Stationära eller stora mobila system

För att ett HPM-vapen ska förstöra skyddad elektronik på ett avstånd av minst några hundra meter bedöms en pulseffekt uppemot 10 GW under någon eller några tiondels mikrosekunder krävas. Sådana system bedöms, med dagens teknologi, ha en volym av några kubikmeter och väga flera ton och således till sin natur bli stationära. Möjligen skulle de kunna bäras av ett större bepansrat fordon. I dagsläget är verkningsgraden vid omvandlingen från elektrisk energi till en HPM-puls ca 10 %. Således skulle pulsgeneratoren behöva producera en elektrisk pulseffekt i storleksordningen 100 GW med en pulslängd på 1 mikrosekund.

- HPM-granater och substridsdelar i robotar

HPM kan också genereras av små HPM-vapen med en vikt av några till några hundra kg. Genom att nyttja explosivämnen för att generera den erforderliga elektriska energin för att driva mikrovågskällan kan storleken på systemet hållas liten. Sprängämnesdriven piezoelektrisk generator och sprängämnesdriven magnetflödeskomprimerande generator är två exempel på spänningspulsgeneratorer för stridsdelar av denna typ. HPM-verkansdelen avfyras på avstånd upp till 100-tals kilometer och leverera sin effekt i närheten av tilltänkt mål med

hjälp av artilleri eller en robot. Dessa HPM-verkansdelar bedöms kunna förstöra oskyddad elektronik på ett avstånd av upp till 100 m medan verkan mot skyddad elektronik sannolikt inte kan uppnås på avstånd överstigande tiotalet meter.

I en robot, där stridsdelen kan väga mer än 50 kg, kan mikrovågsstrålningen genereras genom att accelerera elektroner i vacuumkaviteten i ett mikrovågströr, t.ex. en virkator, av en högspänningspuls på 0,3 till 1 MV. Den mikrovågsstrålning som genereras blir smalbandig och väl definierad i frekvens. HPM-pulser med en effekt på 5-10 GW, en pulslängd på ca 0,1 mikrosekunder och en energi på ca 0,5-1 kJ kan idag uppnås med sprängämnesdriven generator i en stridsdel med en vikt på några hundra kg.

- Bredbandiga lågfrekventa pulsvapen

Bredbandiga lågfrekventa pulsvapen, ibland benämnda icke-nukleär EMP (NNEMP⁵⁰), och antenner som genererar en dämpad sinusoscillation (DS) är typer av HPM-vapen som på grund av deras enkla konstruktion och handhavande lätt kan komma att nyttjas av kriminella eller terrorister i sabotage syfte. Med relativt enkel utrustning bedöms en person, utan alltför djupa teknikkunskaper, till en rimligt låg kostnad i en väska kunna bygga in en HPM-källa, strömförsörjd av ett 12 volts bilbatteri.

Den främsta nackdelen med bredbandiga HPM-störsändare är att det är relativt enkelt att skydda elektronisk utrustning mot denna typ av hot. Genom enkel skärmning av utrustningen eller genom att placera utrustningen nära en metallisk struktur eller jordplan kan ett tillfredställande skydd uppnås. Därutöver är räckvidden tämligen kort.

- Extremt bredbandiga pulskällor (UWB)

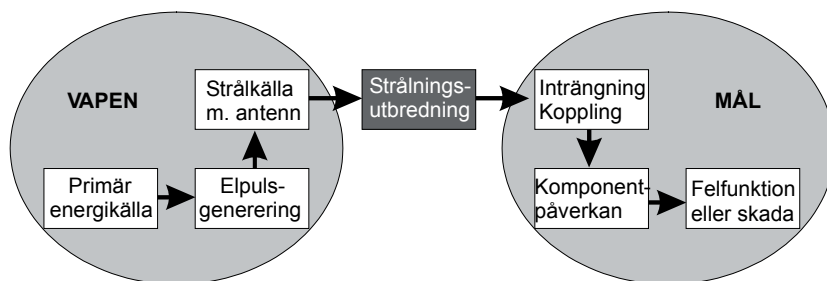
Elektromagnetiska pulser kan också genereras med antenner speciellt utformade för att kunna sända ut mycket korta pulser, ofta bara en enstaka oscillation, som därför blir extremt bredbandiga. Dessa källor matas av en snabb pulsgenerator och kan nå pulsrepetitionsfrekvenser på flera kilohertz. Eftersom energin i varje puls är liten kan dessa system oftast inte förstöra målelektroniken, men den höga pulsrepetitionsfrekvensen gör dem till effektiva störkällor över ett mycket brett frekvensband. Sådana system är ofta transportabla med ett mindre fordon.

50. Non Nuclear Electromagnetic Puls.

6.2.4 Koppling av HPM-strålning och dess verkan på system

HPM-vapen kan användas för att störa och förstöra civila och militära system. En förenklad beskrivning av kopplingsvägen från HPM-källan till målobjektet beskrivs i *Figur 6.4*. Inträngning i målet kan ske på två sätt nämligen via bakvägs- eller framvägskoppling. Detta beskrivs mer utförligt i avsnittet HPM-skydd nedan.

1. Framvägskoppling: Mikrovågsstrålningen tränger in genom sensorer, antenner etc.
2. Backvägskoppling: Mikrovågsstrålningen tränger in via ofullkomligheter i skärmningen och via kablage som passerar skärmningen utan adekvat filtrering för att sedan koppla till elektroniken.



Figur 6.4. Verkanskedjan. (Källa: FOI)

HPM-strålningen verkar genom att en elektronisk komponent störs, degraderas eller förstörs. Förstörelse eller degradering sker ofta till följd av de höga temperaturer som uppstår som en följd av de höga strömpulser som induceras vid bestrålningen varvid halvledarmaterial smälter. Ledningsmönster på kretskort kan då få avbrott och halvledarkomponenter, t.ex. dioder, kan kortslutas. Till följd av mikrovågs-bestrålningen kan även kvarstående fel uppstå i form av att minneskretsars innehåll förändras, en bilmotor stannar när reglerelektroniken sätts ur spel eller en dator upphör att fungera.

Baserat på mångårig forskning vid FOI kan erfarenhetsmässig konstateras att oskärmade system ofta störs vid en fältstyrka av någon eller några hundratals V/m. För att system ska förstöras krävs fältstyrkor av storleksordningen minst 10 kV/m. Stationära eller stora mobila system kan förstöra mål på kilometeravstånd vid fri sikt. Ett oskyddat radiolänksystem, där parabolens oavsiktligt fungerar som mottagarantenn för HPM-strålningen, bedöms kunna förstöras på tiotals kilometers avstånd.

Det är stora variationer i den energinivå som krävs för att förstöra olika komponenter. Dock har det rapporterats om energinivåer på 1 μJ för att för-

störa elektroniska komponenter. Det är dock rimligt att utgå ifrån att energinivåer på 1 milli Joule (1 mJ) krävs, för att med säkerhet kunna förstöra halvledarkomponenter. Enligt ovan är det energinivån som åstadkommer den höga temperatur som förstör de elektroniska komponenterna. Ett sätt att öka temperaturen är att genomföra så kallad stackning. Detta åstadkommes genom att ha en mycket hög pulsrepetitionsfrekvens på de utsända mikrovågspulserna. Här igenom hinner den värme som utvecklas av en puls inte ledas bort innan nästa puls kommer. Temperaturnivån ökas hela tiden, tills den nivå som krävs för förstöring uppnått. Det krävs dock en pulsrepetitionsfrekvens på några kHz och däröver.

Komponenter som utsätts för mikrovågsstrålning kan sluta att fungera permanent eller tillfälligt. Ibland kan de efter en viss tid återhämta sig, men exempelvis minneskretsars innehåll kan ha förändrats. Därutöver kan det uppstå latent fel som orsakar snabbåldring av komponenterna. Vad det är i det elektriska systemet som blir påverkat, beror inte endast på systemets uppbyggnad och själva HPM-vapnet. Det kan även bero på i vilken aspektvinkel som målet blir belyst, var någonstans i arbetscykeln som systemet befinner sig och olika HPM-tålighet hos olika individer av samma sort av komponenter⁵¹. Störning av elektroniska komponenter beror på den effekt som systemet utsätts för och är inte energiberoende. Detta innebär att den elektriska fältstyrkan för störning är relativt okänslig för pulslängden, men varierar med våglängden.

Den absorberade effekten hos den elektroniska komponenten kan tecknas:

$$P_s = \frac{E^2}{Z_0} * A * \frac{1}{SE} \text{ [W]}$$

E = Elektriska fältstyrkan (V/m)

Z_0 = Vågimpedansen i vakuum $\approx 377 \text{ } [\Omega]$

SE = Skärmverkan för det hölje i vilket komponenten är placerad

A = Effektiv absorptionsarean hos ledningen som ansluter till komponenten

Den effektiva absorptionsytan erhålls genom:

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} * G * p * q \text{ [m}^2\text{]}$$

G = Antennförstärkning

p = Polarisationsverkningsgraden, $0 \leq p \leq 1$

q = Impedansanpassningsfaktorn, $0 \leq q \leq 1$, sätts oftast till 1 för att ge en

51. <http://eurekaerospace.com/hpems.php>

uppskattning av den största påkänning som en elektronisk komponent kan utsättas för.

För framvägskoppling antas att den infallande strålningen har rätt polarisation varför $p = 1$ ansätts. För bakvägskoppling antas att isotropa förhållanden råder i det skärmade utrymmet vilket leder till att $G \approx 1$ och $p = 1/2$.

Genom att sända ut ett stort antal pulser efter varandra kan störningen få en extrem verkan på de komponenter som utsätts för den.

Till skillnad från störning, är förstöringen av elektroniska komponenter beroende av energin i den utsända pulsen, där energin är effekt multiplicerat med tid. Förstörelsen av en elektronisk komponent beror oftast på den temperaturhöjning som är en konsekvens av den strålning som komponenterna utsätts för, vilket resulterar i att halvledarkomponenten eller ledarna på den integrerade kretsen smälter.

6.2.5 Verkansavstånd för HPM

Baserat på genomförda systemprov avseende mikrovågsbestrålning av bilar, datorer och annan utrustning kan relevanta verkansavstånd uppskattas för HPM-källor, se *Tabell 6.1*. Notera att tabellen ger uppskattade värden. Verkan i målobjektet beror inte bara på källans pulseffekt utan också på pulslängd, pulsrepetitionsfrekvens, antennens riktverkan samt målobjektets sårbarhetsnivå. Stationära eller stora mobila HPM-vapen har fördelen att kunna bära stora antenner med hög riktverkan.

För ett sabotageangrepp bedöms den förväntade pulseffekten hos HPM-källan inte överstiga 10-100 MHz. Baserat på systemprov med bilar, datorer mm har uppskattade verkansavstånd för mindre HPM-källor som kan nyttjas i sabotage syfte beräknats, se *Tabell 6.2*.

Eftersom det är svårt att tillverka bredbandigt effektiva antenner kan det vara svårt att få ut tillräckligt av den i den bredbandiga HPM-störsändare tillgängliga energin till strålning. Dessutom är det svårt att åstadkomma god riktverkan på antennen för denna typ av vapen, vilket innebär att de endast går att nyttja på korta avstånd.

Tabell 6.1. Uppskattade verkansavstånd för HPM-källor

| HPM-KÄLLA | AVSTÅND | | | |
|---|------------------------|------------------------|--------------|--------------|
| | Några 10-tal meter | 500 meter | 1 500 meter | 15 km |
| Stort HPM-vapen På land eller fartyg (P = 10 GW) | Permanent fysisk skada | Permanent fysisk skada | Störning* | Störning* |
| Mindre HPM-vapen** Buret i UAV eller kryssningsmissil (P = 100 MW) | Permanent fysisk skada | Störning* | Ingen effekt | Ingen effekt |

- * 1. Kan orsaka permanenta funktionsfel, "låsnings"!
 2. Vid oskyddad inom-bands framvägskoppling (framvägskoppling av första slaget) kan permanent skada fås på dessa avstånd (störning på ännu större avstånd).
 ** För UWB/HPM fås liknande avstånd, men knappast permanent fysisk skada.

Tabell 6.2. Verkansavstånd för HPM-sabotage (smalbandig). Baserat på HPM-provning av bilar, datorer mm. Oskyddad utrustning. Bakvägskoppling och utombands framvägskoppling.

| HPM-KÄLLA | AVSTÅND | | | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|-----------|--------------|
| | Omedelbar närhet | 15 meter | 50 meter | 500 meter |
| I skåpbil (P = 10 MW) | Irrelevant | Permanent fysisk skada | Störning* | Störning* |
| I väska (P = 100 kW) | Permanent fysisk skada | Störning* | Störning* | Ingen effekt |

- * 1. Kan orsaka permanent funktionsfel, "låsnings"!
 2. Vid inom-bands framvägskoppling (framvägskoppling av första slaget) kan permanent skada fås på dessa avstånd.

(Källa: Mats Bäckström, FOI)

6.2.6 HPM-skydd

- Framvägskoppling

Begreppet framvägskoppling används då mikrovågsstrålningen tränger in i målet genom öppningar i objektet som är avsedda för att ta emot eller sända ut elektromagnetisk strålning, t.ex. antenner och sensorer. Då arbetsfrekvensen för antennen eller sensorn överensstämmer med HPM-vapnets frekvens talar man om framvägskoppling av det första slaget. Exempel på detta är då ett HPM-

vapen används i syfte att störa eller slå ut en radiolänk eller en radarsändare. Framvägskoppling av det andra slaget sker när inträngning i målet sker via ett delsystem som arbetar inom ett helt annat frekvensområde, det kan till exempel vara inträngning av mikrovågor via linssystemet i ett IR-system för att skada detektorelement. För att inträngning i målet skall vara optimal erfordras utöver att frekvensområdet är detsamma, även att de bägge systemens antenner är riktade mot varandra, så att inträngning sker via mottagarens huvudlob och inte dess sidolob. För militära system måste behovsanalys och skydd mot framvägskoppling göras specifikt för varje objekt. I militära applikationer finns det ofta någon form av skydd i de sensorer och antenner som används, vilket i sin tur kan minska verkan av HPM-strålningen. Sänd/mottagarskydd i radarantennar är ett exempel på det senare, där radarn för sin normala funktion skyddar mottagarkretsarna från den starka radarpulsen som sänds ut.

- Bakvägskoppling

Bakvägskoppling innebär att mikrovågsstrålningen tränger in i målet via de ofullkomligheter i objektets skärm som nästan alltid finns, via oledande packningar, skruv- och nitförband, kontaktdon, kabelgenomföringar, ventilationshål, displayfönster mm och kopplar till ledningar och kablage och via dessa leds vidare till känsliga elektronikkomponenter. Är objektet tillverkat av ett icke-metalliskt material, t.ex. glasfiberarmerad plast utan kolfiberarmering, så sker ingen dämpning av mikrovågsstrålningen vid passagen av skivet varför koppling direkt till kablage och ledningar på insidan kan ske.

Skydd mot bakvägskoppling innebär att elektroniken måste byggas in i välskärmade apparatrum eller apparatskåp. Till elektroniken anslutna ledningar och kablage måste vara skärmade, kabelskärmen avslutas mot apparathöljet och innerledarna filtreras för att ta hand om transienter som överstiger elektronikkens stör- eller skadenivå. Kraven på skärmning och filtrering kan mildras till följd av elektronikens placering. För ett apparatrum långt in i ett berggrum, där kraftförsörjningen sker från egna kraftaggregat och där inga ofiltrerade kablage tillåts föra in transienter, kan lägre krav tänkas ställas på apparatrummets skärm. För att förhindra elektromagnetisk interferens mellan närliggande apparatskåp rekommenderas i allmänhet dock att apparatskåpen skall vara skärmade för att uppfylla kraven på god EMC.

Det är viktigt att en skärm, vare sig det rör sig om ett metalliskt apparatskåp eller en tjock betongvägg, inte får ha några stora öppningar i konstruktionen. Om öppningens dimension i någon ledd (längd, bredd eller diagonalt) är i samma storleksordning som mikrovågsstrålningens våglängd ger öppningen inte någon dämpningseffekt överhuvudtaget. I ogynnsamma fall kan till och med en förstärkning av det infallande fältet fås på insidan av en sådan öppning i skärmen.

Eftersom våglängden för HPM-vapen vanligen är i storleksordningen decimeter eller centimeter, vilket överensstämmer med avståndet mellan skruvar och nitar i skarvar samt storleken på displayfönster mm är det ofta svårt att fullständigt skydda sig mot HPM-vapen. Detta är ett av motiven att nyttja HPM-vapen.

Skärmverkan är oftast starkt frekvensberoende, jämför diskussionen ovan om dimensionen på öppningar i skärmar. Ledande material har normalt en högre skärmverkan med ökande frekvens. För metallplåt av mm tjocklek fås, på grund av den höga elektriska ledningsförmågan, en god skärmverkan ända ned i kHz-området.⁵² Detta innebär att det är ofullkomligheter i det metalliska höljet, såsom beskrivet ovan, som begränsar skärmverkan och inte metallens fysikaliska egenskaper. Med utgångspunkt i provresultat kan konstateras att en skärmverkan på 60-70 dB bedöms vara tillräcklig även mot mycket kraftiga militära HPM-vapen med topp effekt på tiotal GW. Med en skärmverkan i denna storleksordning är risken för förstörande verkan närmast obefintlig och verkansavståndet för störning bedöms reduceras till ett tiotal meter. Som jämförelse kan nämnas att kommersiella skärmrum har en skärmverkan i storleksordningen 100 dB i frekvensområdet 1 till 10 GHz. Skydd mot HPM kan till största del lösas av relevanta tekniska åtgärder, men stridstekniska och taktiska åtgärder kan behöva komplettera de tekniska åtgärderna. En ytterliggare utmaning i skydd mot HPM är trenden att använda COTS i militära system, vilket generellt leder till ökad sårbarhet mot HPM⁵³. Kommersiella standardprodukter är oftast inte specificerade och dimensionerade för att kunna tåla mikrovågsstrålning på det vis som kan specificeras för militära system.

6.2.7 Användningsområden för HPM-vapen

En hotbildsstudie HPM genomfördes 1999⁵⁴ av Håkan Andersson vid FOI på uppdrag av Försvarsmakten och FMV. Rapporten behandlar begrepp och definitioner inom HPM-området, systemaspekter, HPM-källor och HPM-skydd. Typsituationer och scenarier för operativt/taktiskt bruk av HPM-vapen presenterades enligt nedan:

- Insats mot ledningssystem och stabspplatser
- Insats mot ett fördelningsområde
- Insats mot och skydd av marinstridskrafter till sjöss och i kustzon

52. Moberg och Wiss (2001). "FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd".

53. FOI orienterar om nummer 1, 2001, sidan 67. ISBN 91-7056-104-4.

54. Håkan Andersson, *Hotbildsstudie. Högeffekt Pulsad Mikrovågsstrålning (HPM)*, FOA-R--99-01244-612--SE, november 1999.

- Insats mot och skydd av flygbas
- Insats mot förrådsställd materiel och transport av känslig materiel
- Insats mot totalförsvar och civila objekt
- Insatser i internationella operationer

Dessutom presenterades i översiktligt ett stort antal spelkort⁵⁵ vilka mer detaljerat beskrevs såväl taktiskt som tekniskt i en hemlig bilaga till rapporten. Spelkort som redovisades behandlade följande möjliga plattformar:

- Flygburna HPM-system
- Explosivämnesgenererade stridsdelar
- Markbaserade HPM-system
- Fordons/fartygsbaserade HPM-system

En komparativ studie mellan elektromagnetiska och konventionella vapen (och skydd) i samband med internationella insatser genomfördes inom ramen för projektet VEV ”Värdering av elektromagnetiska vapen och skydd” under 2002⁵⁶. Ett antal tematiska typsituationer beskriver svenska förbands behov av skydd mot HPM, samt hur de skulle kunna nyttja HPM-vapen. En jämförelse med vilka konventionella vapen som går att använda istället för HPM-vapen redovisades. Dessutom identifierades vissa specifika situationer där HPM-system skulle kunna komplettera konventionella vapen. Studiens syfte var att belysa EM-vapen ur tekniskt, taktiskt och ekonomiskt perspektiv samt att värdera nytan och hotet relativt konventionella vapen. HPM-vapnens icke-dödliga egenskaper lyftes fram. Dessa egenskaper gör att HPM-vapen kan vara intressanta som ett komplement till andra vapentyper. Ett exempel kan vara som ”elektronisk murbräcka” för att (åtminstone under kortare tid) slå ut motståndarens system, så att egna vapen kan verka i en miljö av nedsatt motverkan.

Anders Callerts utredning (EU) vid FHS med titeln ”HPM-tillämpningar i internationella insatser” analyserade ett antal scenarier i fredsbevarande och fredsframtvängande utlandsmissioner där en svensk fredsstyrka möter en lågteknologisk respektive en högteknologisk motpart. Slutsatsen är att HPM-vapen kan vara en viktig resurs inom vissa situationer, särskilt mot en högteknologisk motpart.

55. Ibid.

56. C. Andersson, M. Stenström och Å. Wiss, *Värdering av HPM-vapen och skydd. En komparativ studie av HPM- och konventionella vapen*. FOI--0664--SE, December 2002.

HPM-studien ”HPM – hot och möjlighet i NBF”⁵⁷ utarbetade en lista med användningsområden för HPM-vapen. Arbetet syftade till att ta fram en lista över mål och situationer där HPM-vapen kan vara särskilt intressanta att använda. Samma HPM-vapen kan användas mot flera mål/situationer. Ett viktigt ingångsvärde vid framtagandet av listan har varit att påvisa nyttan med att använda HPM jämfört med någon annan verkansform. När det finns existerande alternativ som bättre eller billigare kan lösa en uppgift finns det ingen anledning att ta fram HPM-vapen för situationen.

Listan kan även användas för att dra slutsatser om när vi själva kan bli utsatta för HPM, och om vilka system och objekt vi därför bör skydda. Vid arbetet med att ta fram listan uppmärksammades områden där vi för närvarande inte har tillräcklig kunskap, vilket är ett viktigt ingångsvärde för fortsatt kunskapsinhämtning och forskning. Detta har markerats med frågetecken i listan. De reduceringar som gjordes i studiens verksamhet föranledda av besparingsåtgärder medförde att nedanstående tabeller får ses som ett första utkast som utgör en grund för fortsatt arbete och fördjupning.

Listan är uppdelad i huvudområdena fred respektive krig. Ursprungligen fanns inriktningen att även ha en del med rubriken ”Internationella insatser”. Denna idé övergavs eftersom det finns en stor spännvidd i de situationer som ryms inom begreppet, och tänkbara situationer spänner mellan såväl freds- som krigsliknande vilka därmed belyses under de båda andra rubrikerna. Internationella insatser är dock ett mycket intressant användningsområde för HPM-vapen beroende på deras icke dödliga karaktär.

Kolumnen *mål* beskriver vilken typ av mål HPM-vapnet skulle kunna användas mot. Kolumnen *situation* beskriver kortfattat exempel på situationer där det kan vara aktuellt att använda HPM mot dessa mål. Kolumnen *vapentyp* beskriver schematiskt vilka typer av vapen som skulle kunna användas med fokus på bärare vilket indirekt sätter ramar för t.ex. storlek och räckvidd. Kolumnen *nytta* är en kortfattad beskrivning över nyttan med att använda just HPM jämfört med annan konventionell verkansform. Kolumnen *nackdel/osäkerhet* indikerar nackdelar och frågeställningar som behöver studeras vidare.

Under rubriken Fred används kursiv stil för de icke militära användningsområdena.

Nedan återges endas några exempel ur denna lista. För hela listan hänvisas till den ovannämnda hotbildsstudien HPM.⁵⁸

57. S. Silfverskiöld, et al., *Studien ATK 99064S HPM – hot och möjlighet i NBF*, Bilaga 1 till 12 860:77394, Försvarsmakten, 2003-12-01.

58. Ibid.

Tabell 6.3. Situationer i fredstid där vi har en fördel med att använda HPM-vapen jämfört med andra metoder

| Fred | | | | | |
|-----------------------------|---|-----------------------------------|--|---|--|
| Mål | Situation | Vapentyp | Nytta | Nackdel/osäkerhet | |
| Fordon (bil, båt) | Stoppa fordon som forcerar vakt, <i>tull</i> , <i>polis</i> . Stoppa terrorister med sprängmedelsfyllt fordon. | Fordons stoppare | Stoppa fordon utan dödligt våld eller personskador. Slippa använda t.ex. spikmatta. | Påverkan på styrning och bromsförmåga? | |
| Kommunikation/info | Fängelse, upplopp, gisslansituation. Buggade rum. | "Diehl-störare" Bredbandig HPM | Kan störa ut allt, till skillnad mot traditionella störare. Tex telefon, mobilfn, tv, "bluetooth", komradio. Sanera buggade rum. | | |
| Tridsstyr/fjärrutlöst bomb. | Politiska möten, demonstrationer, vip konvoj, utpressning mm | Fordonsburet Bärbart | Med HPM desarmera bomb eller få den att utlösa på betryggande avstånd | Desarmerar bomb eller detonerar den? Går det att störa fjärrutlösning av bomb? Får vi utsätta människor för dessa nivåer? | |
| HPM-sabotage vapen | Någon försöker använda ett HPM-vapen för sabotage | Fast anläggning Fordonsburet | Eget HPM-vapen bekämpar sabotagevapnet när det kommer nära. | Sabotagevapnet dolt och svårt att upptäcka. | |

Tabell 6.4. Situationer i fredstid där en brottsling eller terrorist kan tänkas nyttja HPM-vapen

| Fred | | | |
|---|--|---------------------------|---|
| Mål | Situation | Vapentyp | Nackdel/osäkerhet |
| Personskydd | En terrorist vill stör/förstöra ltvakternas kommunikation inför attentat mot VIP | Handburet Fordonsburet | Robusthet hos kom. system bör provas genom KBM i samarbete med FMV och FOJ. Möjlighet att indikera HPM-sändning innan den är inom verkansavstånd? |
| Tillträdesskydd till militära och civila skyddsobjekt | Någon vill sätta skyddet ur funktion inför intrång | Handburet Fordonsburet | Bör provas genom KBM i samarbetet med FMV och FOJ. Skydd av små kameror. Behov av förbud mot kamera i mobilftn inom skyddsobjekt. |
| Oskyddade datorer | Ekonomis.k. brottslighet önskar slå mot finansiella system. Terrorister slår mot militära system. | Handburet Fordonsburet | Utveckla skydd för oskyddade civila och militära datorer? |
| GPS-system | Terrorister försöker slå ut GPS-system som leder polisiära resurser. Värdetransport råhare slår ut lokaliseringen | Handburet Fordonsburet | Studera och utveckla myndighetsvisa skydd av GPS genom KBM försorg. |
| Flygplats | Terrorister vill slå ut trafikledning, ILS, och kommunikation, radarhöjd-mätare vid nedsatt sikt. Ta sig fram, verka dolt och komma undan oupptäckt. | Fordonsburet | Robustheten hos systemen? Detekteringsutrustning möjlig? |
| Elektroniska röstningsmaskiner | Någon försöker otillbörligen påverka omöjliggöra röstning | Handburet Fordonsburet | Har i USA konstaterats ha låg EMC-tålighet. Robustheten behöver studeras inför ev. införande i Sverige. |
| Spelautomater | Någon försöker tillskans sig vinster med handburet HPM-vapen. Nyttjas i utpressningssyfte. | Handburet | Problemet har identifierats i USA. Ska vi utveckla skydd? |
| Kommunikationssystem | Någon vill slå ut telestationer, noder mm med öppna/dåligt stängda skärmluckor | Fordonsburet | Hur kan vi skydda oss? |

6.2.8 Rättsläge avseende HPM-vapen

Ett stort antal frågeställningar om vilka lagar som kan vara tillämpliga på HPM-vapen identifierades inom HPM-studien. Det ifrågasattes om gällande lagar är tillräckliga för att stoppa en brottsling eller terrorists användning av HPM-vapen. Vilket lagrum kan tillämpas om en gärningsman ställer sig vid sidan av en väg och med ett HPM-vapen förstör eller stör bilelektronik så att bilar stannar? HPM-vapen täcks säkerligen inte av vapenlagen, däremot gäller enligt lagen om elektronisk kommunikation ett generellt förbud mot störsändare. Det finns dock ett undantag för militär störsändning. Vid förstörelse av elektronik kan det klassas som skadegörelse, men det kan dock vara svårt att komma åt en gärningsman p.g.a. HPM-vapens förmåga att verka utan att märkas. En gärningsman skulle kunna hävda att det enbart handlade om en stark radiosändare.

6.3 Laser⁵⁹

6.3.1 Allmänt om laser som vapen

Laservapen indelas i två klasser; ”antisensorlaser” och ”strukturförstörande laser”⁶⁰ och effekten av laservapen kan vara allt från att blända en bildförstärkare till att bränna sönder konstruktionsmaterial. Antisensorlaser användas mot olika typer av sensorer, inklusive ögon, vilket även kan innebära viss typ av mekanisk förstöring. Strukturförstörande laser är något som studeras och provas. Mycket höga effekter krävs dock för att uppnå någon verkan. I första hand tänker man sig i dagens läge bekämpning av ballistiska missiler från (högt) flygande plattformar. På dessa höjder underlättas strävan att nå verkan av att atmosfären är mycket tunn.

Antisensorlaserns primära syfte är att verka mot optiska sensorer genom att störa, blända eller vilseleda. Detta skall i sin tur syfta till att ge tid för någon form av motåtgärd mot det aktuella hotet. Denna typ av lasrar finns i utförande som handburna, fordonsburna eller som fartygsburna. Exempel på verkan är att i det svagaste fallet enbart blända motståndaren till att störa eller förstöra optiken i mätinstrument och i andra optiska hjälpmedel.

6.3.2 Strukturförstörande laser

Syftet med en strukturförstörande laser är att ändra materialegenskaperna i målet. Det kan exempelvis vara att frosta optiken på en sensor. Frostning innebär

59. Se även avsnitt 9.8.7 och Lärobok i Militärteknik vol. 2, (LIM 2): Sensitiveknik, kapitel 6.

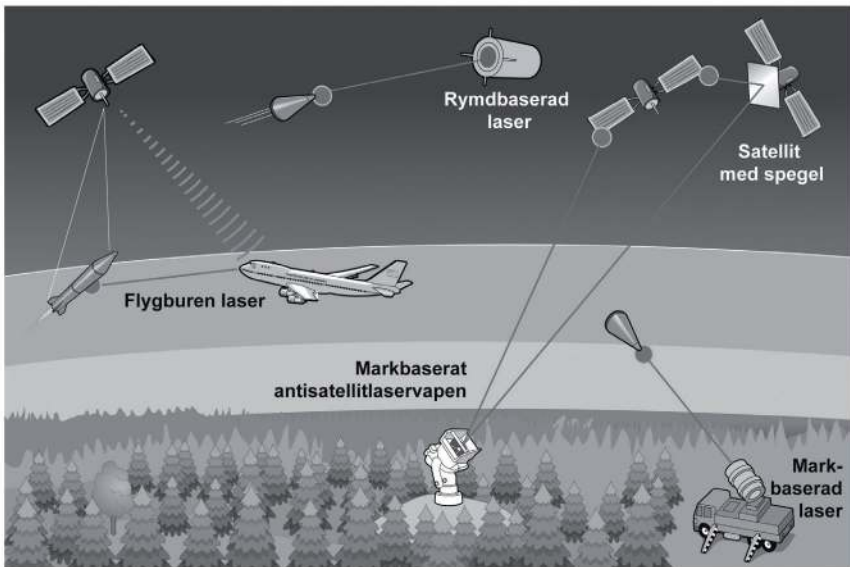
60. FOI, Orienterar om nummer 1 2001 Elektromagnetiska vapen och skydd, sid. 23.

att laserenergin värmer upp optiken så mycket att det bildas mikrosprickor i ytan på optiken. Det krävs betydligt högre energi för att bränna ett hål i metall, dvs. tunna metallhöljen, och att bekämpa bepansrade fordon är idag ännu inte möjligt.

Strukturförstörande laser kan användas mot, som nämnts ovan, sensoroptik, huvar på helikoptrar, bränsletankar och radomer (skyddshöljet på en flygburen radar) för att skada ytan på radomen som i sin tur innebär att lobmönstret från radarn påverkas.

Med konventionellt luftvärn är det svårt att bekämpa kryssningsmissiler och UAV:er, här kan en strukturförstörande laser vara ett intressant alternativ. Rymden är också ett intressant område för laservapen eftersom problematiken med strålutbredning i atmosfären inte finns i samma omfattning i rymden.

Skall ett system som kan leverera lasereffekter i MW konstrueras ligger den tekniska utmaningen i att kunna få fram system som är kompakta till rimlig kostnad med bibehållen kvalitet.



Figur 6.5. Principskiss strukturförstörande laser (Källa: FOI)

Sammanfattningsvis kan konstateras att laservapen, antisensorlaser och strukturförstörande laser, har stora fördelar men också vissa begränsningar. Tekniken möjliggör att det går att lokalisera, mäta in och verka inom delar av en sekund, men en begränsning är att verkan krävs under en viss tid och att det måste vara fri sikt på målet.

Fördelar:

- Rikta direkt, ingen framförhållning (ljusets hastighet)
- Strålen i många fall osynlig och ljudlös
- Klarar flera snabba och manövrerande mål samtidigt, snabb målväxling
- Stor potentiell eldkraft

Nackdelar:

- Målet måste hela tiden vara synligt, fri sikt
- Viss verkanstid krävs
- Väderberoende
- Kostnaden för systemet

Strukturförstörande lasersns verkan är att med hög effekt ändra material-egenskaperna i det konstruktionsmaterial man beskjuter. Den används huvudsakligen som en del i ett luftförsvar, bedöms inte idag vara kostnadseffektiv som ett vapen mot bepansrade fordon⁶¹. Helikoptrar, lågflygande kryssningsrobotar och UAV:er om 15-50 stycken samtidigt inkommande på 5-7 km avstånd är att betrakta som möjligt att bekämpa med denna typ av laservapen. Målet är att beskjuta fönster på sensorer, bränsletankar eller huv på helikopter. Bekämpningen av mål i rymden lämpar sig väl då satelliter betraktas som mjuka mål med solceller, sensorer etc.

6.3.3 Prognos för laservapen mot 2015-2020

Antisensorlasersystemet är under stark utveckling och flera nya system bedöms vara operativa inom de närmaste åren.⁶²

En explosivämnesdriven laser är idag främst användbar som sensorstörande eller sensorförstörande men i framtiden kan även en förstörande laser vara ett tänkbart nytt laservapen som även är tekniskt möjligt att uppnå inom aktuellt tidsram. Idag finns endast jodlasen omnämnd i öppna handlingar men här finns det potential för andra typer av lasrar.⁶³

Avancerade system med förstörande verkan mot moderna robotar och mot de mest kvalificerade avbildande IR-målsökarna bedöms bli operativa 2010-2020.⁶⁴

61. FOI, Orienterar om nummer 1 2001 Elektromagnetiska vapen och skydd, sid 32.

62. FMV, Tekniska utvecklingstrender, FMV beteckning Analys 23210:2515/2001, sid 97.

63. FOA underlagsrapport, Teknisk. horbild 2015-2025 Delrapport 1 – Teknikutveckling, sid 63.

64. FMV, Tekniska utvecklingstrender, FMV beteckning Analys 23210:2515/2001, sid 97.

USA utvecklar nu ett vapensystem på strategisk nivå med lasern som huvudinstrument och som syftar till att erbjuda ett fullgott skydd mot interkontinentala robotar som exempel på storskalig terrorism. Detta system bedöms vara utvecklat under tidsperioden 2015-2020.⁶⁵ Parallellt utvecklas också ett taktiskt system med räckvidd på ca 20 km riktat mot hotet från kryssningsmissiler liksom ett fordonsburet system för nedskjutning av granater, raketer och andra luftmål. Dessa båda taktiska system bedöms, beroende på tilldelningen av ekonomiska medel, kunna visa operativa prestanda inom 1-3 år.⁶⁶

6.3.4 Sammanfattning laservapen

Inledningsvis konstaterar man att lasern som vapen, åtminstone i större omfattning, utvecklas främst av USA (och möjligen Kina) vilket är en viktig parameter i ett framtida scenario eller i en hotbildsanalys inför en kommande uppgift.⁶⁷ Det innebär dock inte att man kan avstå från att analysera motståndarens eventuella tillgång till laservapen efter en eventuell spridning genom försäljning eller nytillverkning.

Antisensorlasern är ett realiserbart vapensystem som finns idag och med dess ständigt pågående utveckling kommer detta vapen att utgöra ett möjligt medel i en framtida militär konflikt. När det gäller den strukturförstörande laserns framtid ter den sig mer osäker. Dels på grund av den ekonomiska faktorn och dels på det faktum att ju högre effekt man vill få ut av lasern desto större blir kraftaggregaten på grund av att verkningsgraden endast är några få procent (ett sätt att dramatiskt minska storleken på lasern är att utveckla en explosivämnesdriven laser vilket kommenterats under avsnitt 6.2.3. Det pågår systemutveckling på såväl taktisk som strategisk nivå vilket medför att man inte kan bortse från ett förstörande laservapen i framtiden. Tänkbara plattformar för ett framtida högeffektivt vapen är fartyg, flygplan eller satelliter.

65. FMV, *Tekniska utvecklingstrender*, FMV beteckning Analys 23210:2515/2001, sid 100-102

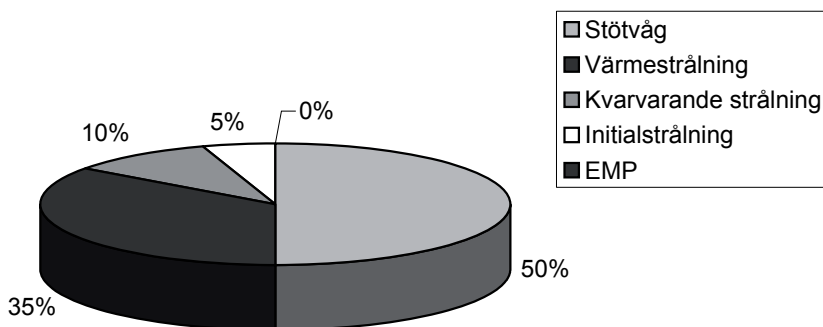
66. Ibid.

67. Ibid.

7. Nukleära stridsdelar (N- o R-stridsdelar)⁶⁸

N-stridsdelar är vad man normalt kallar kärnvapen. Dessa bygger på att tunga atomkärnor som uran eller plutonium spjälkas (fissionsladdning) eller att lätta atomkärnor som väte slås samman (fusionsladdning). Dessa processer ger extremt mycket energi per stridsdelsvikt som till största delen övergår i konventionella verkansformer – tryck, värme och kringflygande föremål. Dessutom erhålls radioaktiv strålning som ger såväl momentana (initialstrålning) som långsiktiga effekter.

Avsikten med N-stridsdelar är att slå ut stora områden eller extremt välskyddade mål som berganläggningar samt särskilt farliga punktmål som kärnvapenbestyckade interkontinentala robotar. Den radioaktiva strålningen ger dock så långvariga negativa effekter att många länder frivilligt skrivit på ett avtal om att inte skaffa eller sprida denna typ av vapen. Nya typer av kärnvapen med måttlig energiutveckling avsedda för djupt nedgrävda mål har börjat studeras.



Figur 7.1. Hur den totala energin från en luftbriserande fissionsladdning fördelar sig mellan olika verkansformer. (Källa: FOI bearbetad av FHS)

68. Se även FOA orienterar om kärnvapen. Nummer 15, 1990. ISBN 91-7056-076-5.

7.1 Radioaktivitet och joniserande strålning

Enligt Bohrs välkända atommodell består all materia av atomer där elektroner med negativ elektrisk laddning kretsar i s.k. elektronskal på olika avstånd kring en kärna bestående av protoner med positiv laddning och oladdade neutroner. En nuklid är ett atomslag karakteriserat av ett visst antal protoner och neutroner i kärnan. Antalet elektroner och protoner är lika i alla elektriskt oladdade atomer, medan däremot elektriskt laddade s.k. joner har ett över- eller underskott av elektroner i förhållande till antalet protoner.

Det s.k. atomnumret som utgörs av antalet protoner i kärnan är specifikt för varje grundämne. Det s.k. masstalet är summan av antalet protoner och neutroner i kärnan. Olika nuklider av ett visst grundämne kallas isotoper där antalet protoner alltså är gemensamt men neutronantalet varierar. Exempelvis så har det enklaste grundämnet väte alltid atomnumret ett (en proton i kärnan) men tre olika isotoper där masstalet varierar från ett till tre (en proton samt noll, en, eller två neutroner i kärnan). I kärnfysikaliska sammanhang anges ofta den aktuella isotopen som grundämnets beteckning följt av masstalet. Exempelvis U 238 som innebär uran med masstalet 238. Olika isotoper av ett visst grundämne har ofta en försumbar skillnad vad avser *kemiska* egenskaper, medan de fysiska egenskaperna varierar mer.

Vissa nuklider är radioaktiva (= strålände) vilket innebär att atomkärnorna är instabila och sönderfaller spontant. Det radioaktiva sönderfallet kan ske på olika sätt men innebär alltid att kärnan omvandlas såväl vad avser masstal som atomnummer – således uppstår härmed ett annat grundämne som kan ha helt andra såväl kemiska som fysiska egenskaper än det ursprungliga! Den s.k. halveringstiden anger hur lång tid som åtgår innan hälften av atomkärnorna i det ursprungliga grundämnet fallit sönder. Ett radioaktivt ämnes aktivitet mäts i enheten Becquerel (Bq), och ofta per kilogram. Där 1 Bq/kg innebär ett kärnsönderfall per sekund och kilogram av ämnet. En äldre enhet för aktivitet är Curie där 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq (aktiviteten hos ett gram radium).

Det radioaktiva kärnsönderfallet sker under utsändande av s.k. joniserande strålning. Strålningen utgörs av flera olika varianter beroende på hur sönderfallet sker: alfastrålning (α) består av heliumkärnor med två protoner och två neutroner, betastrålning (β) består av elektroner och positroner, gammastrålning (γ) av fotoner (ljuspartiklar) med högt energiinnehåll, och neutronstrålning (n) som namnet antyder av neutroner. Röntgenstrålning har samma egenskaper som gammastrålning men annat ursprung. Samtliga dessa strålningsvarianter är osynliga, och även i övrigt omöjliga att märka med våra sinnen. Särskilda instrument krävs därför för att detektera förekomsten av joniserande strålning.

Strålningen dos mäts i enheten Gray (Gy). Oftast används centygray (cGy) för att göra det mer lätthanterbart vid mätning. Vid bestrålning av objekt måste

man ta hänsyn till strålslaget. Detta görs genom en s.k viktningfaktor som varierar mellan strålslagen. Detta kallar man en ekvivalent dos. För att veta vilken effekt strålningen har på en människa använder man organviktningfaktorer. Summan av alla dessa är 1. den totala mängden strålning i en människa multiplicerat med organviktningfaktorerna kallas effektiv dos och mäts i Sievert(Sv). Ofta använder man milliSievert(mSv) för att göra det mer lätthanterbart vid mätning.

Dohastighet är hur stark strålningen är vid ett givet tillfälle. Den mäts oftast i centiGray per timma (cGy/h) eller i milliSievert per timma (mSv/h). T ex om ett objekt bestrålas i två timmar med 2,5 cGy/h blir den ekvivalenta dosen 5 cGy. Om objektet är en människa och strålslaget gammastrålning blir den effektiva dosen 50 mSv.

Strålningen reduceras när den passerar genom materia. Man säger att material/ämnet har en viss halveringstjocklek vilket är den tjocklek av ämnet som krävs för att minska strålningens intensitet till hälften. Kompakta material med hög densitet, som t.ex. bly, har låg halveringstjocklek och skyddar därmed bäst mot strålning. Här nedanför presenteras en tabell över luftens ungefärliga halveringstjocklek för olika strålningsvarianter.

Avseende halveringsavstånd så halveras ej partikelstrålning(alfa och beta) Dessa inbromsas, d.v.s stoppas och har beroende på sin energi en definierad räckvidd. Gamma och röntgenstrålning däremot halveras.

Tabell 7.1. Ungefärliga räckvidder för laddade partiklar

| Strålslag | Räckvidd i luft | Räckvidd i kroppsvävnad | Stoppas av |
|---------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------------|
| α Alfa | 5 cm | 0,05 mm | Kläder, papper, hudens övre skikt |
| β Beta | 10 cm-20 m | Upp till 2 cm | 3 mm stål, 1 cm betong |

Tabell 7.2. Ungefärliga halveringstjocklekar för några material

| Strålslag | Stål | Betong | Vatten |
|---|-------|--------|--------|
| Gamma γ från radioaktivt nedfall | 2 cm | 7 cm | 15 cm |
| Gamma γ i initial strålning | 4 cm | 13 cm | 30 cm |
| n Neutron | 10 cm | 9 cm | 7 cm |

En konsekvens av ovanstående är att utslaget på indikeringsinstrument ofta endast visar gammastrålningen eftersom alfa- och betastrålningen från partiklar i omgivningen inte når fram till instrumentet, som dessutom i allmänhet inte

kan detektera neutronstrålning. Den senare kan dock överslagsmässigt beräknas genom att multiplicera instrumentvärdet med en s.k. neutronfaktor. Alfa- och betastrålning utgör främst en risk när de virvlas upp och kommer in i kroppen med inandningsluften eller födan. Många intensimetrar har en s.k. ”betalucka” som måste öppnas för att på nära håll kunna kontrollera förekomsten av betastrålning, t.ex. efter sanering. För att erhålla korrekta mätvärden är det viktigt att även själva instrumentet skyddas mot radioaktiv kontaminering, t.ex. genom inneslutning i en plastpåse.

Joniserande strålning kan ”slå loss” elektroner från atomer vilka då blir elektriskt laddade och därmed kemiskt aktiva joner.” Joniserande strålning skadar biologisk vävnad genom att jonisera atomer i denna och därmed utlösa kemiska förändringar som påverkar cellernas DNA-molekyler och kromosomer. Skador kan yttra sig som akut ”strålsjuka” med illamående, feber, frossa, trötthet och ökad infektionskänslighet. I svåra fall leder tillståndet till döden. På längre sikt ger höga stråldoser ökad risk för tumörsjukdomar.

Motståndskraften mot strålning varierar för olika individer, men en ungefärlig verkan på kort sikt mot en större population redovisas i tabellform nedan. I *Tabell 7.3* presenteras även några gränsvärden för acceptabla stråldoser i fred och krig.

Tabell 7.3. Gränsvärden för acceptabla stråldoser i fred och krig

| Stråldos | Verkan |
|--------------------------------|--|
| 1 Sv | 0 % sjuka |
| 1,5 Sv | 50 % sjuka |
| 4 Sv* | 50 % döda |
| 4 Sv | 90 % döda |
| Acceptabel dos / åtgärd | |
| 50 mSv | Maxdos per år i fred |
| 300 mSv | Maxdos per dygn i krig |
| 500 mSv | Maxdos under de första två dygnen under krig |

* Grundläggande strålningsfysik av Mats Isaksson, Studentlitteratur 2002.

7.2 Radiologiska (R-) stridsmedel

Så kallade ”smutsiga bomber” verkar genom utspridning av radioaktiva ämnen t.ex. plutonium, kobolt, cesium eller bestrålad zirkoniumoxid. Idag finns inga kända operativa vapen. Försök har dock gjorts bl.a. av Sovjet och USA. Radiologiska stridsmedel kan spridas med såväl med fjärrstridsmedel som genom sabotage. Dock har det visat sig svårt att belägga större områden. Det bör beaktas att en angripare kan använda R- liksom B- och C-stridsmedel för att slå ut människor utan att för den skull förstöra infrastruktur.

7.3 Nukleära (N-) stridsmedel – kärnladdningar

Den fysikaliska grundprincipen för kärnladdningar är frigörandet av en av de fyra fundamentala naturkrafterna⁶⁹; den starka kärnkraften, vilken normalt verkar genom att hålla samman atomkärnorna. Den frigjorda energin kan beräknas med Einsteins allmänna relativitetsteori som den till energi omvandlade massan multiplicerad med ljushastigheten i kvadrat, $E=mc^2$, där den omvandlade massan, m , är skillnaden i massa mellan det ursprungliga ämnet och det/de nya ämnena. Kärnladdningars styrka mäts i den mängd trotyl i ton (t) som explosionen motsvarar; Mt (M = mega = million) respektive kt (k = kilo = tusen).

7.3.1 Fissionsladdningar – ”atombomber”

Det radioaktiva kärnsönderfallet som beskrivs ovan kan också ske på ett mycket våldsammare sätt genom s.k. fission, vilket innebär att atomkärnor i vissa tyngre metalliska grundämnen som träffas av en fri neutron med lagom stor hastighet klyvs till flera nya grundämnen under utsändandet av energi och en eller flera nya fria neutroner. Dessa frigjorda neutroner kan sedan i sin tur klyva nya atomkärnor varvid en lavinartad kedjereaktion uppstår. En förutsättning för att kedjereaktionen skall fortgå är naturligtvis att de fria neutronerna hinner träffa och klyva en ny en atomkärna innan de lämnar det fissila (klyvbara) materialet.

Det krävs således en viss minsta mängd fissilt material inom en begränsad volym s.k. kritisk massa. De i fissionsladdningar vanligen förekommande isotoperna uran 235 och plutonium 239 har den kritiska massan ca 56 respektive 11 kg. Om denna överskrids blir materialet superkritiskt och kärnreaktionen fortgår okontrollerat under våldsam energiutveckling tills dess att det fissila materialet expanderat till en volym som gör att den kritiska massan, eller egentligen densiteten, underskrids. Om det fissila materialet komprimeras (med explosivämnen) minskar den kritiska massan omvänt proportionellt mot kvadraten på

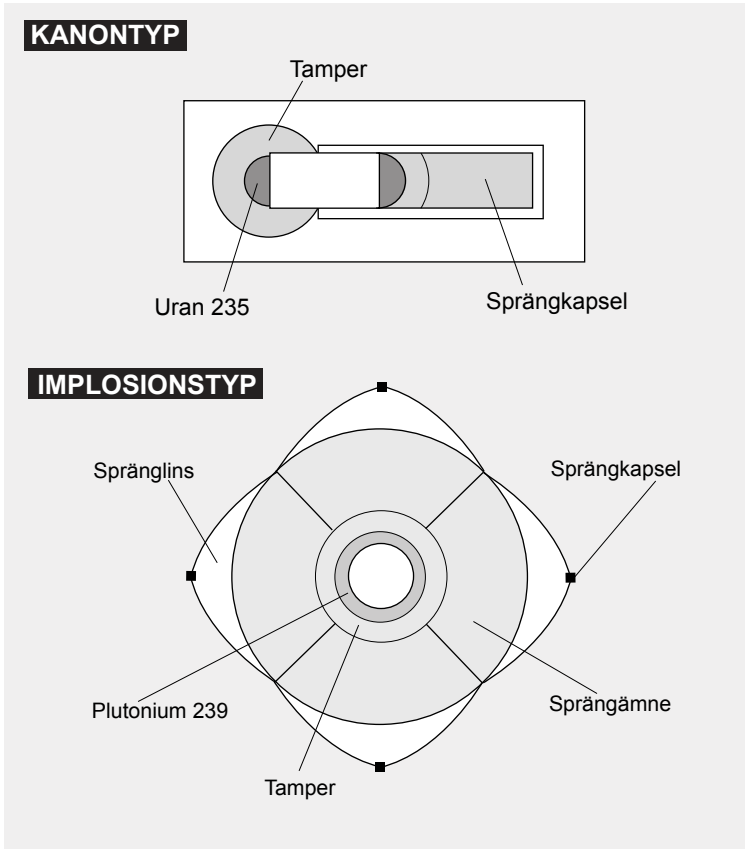
69. Övriga naturkrafter är: gravitationen, den elektromagnetiska kraften och den svaga kärnkraften. (Se t.ex. http://sv.wikipedia.org/wiki/Fundamental_kraft)

densiteten. Dvs. om densiteten t.ex. ökas med en faktor tre, så minskar behovet av klyvbart material, för att erhålla kritisk massa, till en niondel jämfört med det okomprimerade fallet.

Runt det fissila materialet anbringas en s.k. tamper av något kompakt ämne, vanligen naturligt uran 238 eller beryllium. Tampern har till uppgift att reflektera tillbaka de fria neutronerna in i det klyvbara materialet och att ”hålla samman” kärnreaktionen så länge som möjligt. Tampern gör att den kritiska massan kan nedbringas till ca 15 kg U 235 respektive 5 kg Pu 239. Dessutom erfordras en neutronkälla s.k. initiator som har till uppgift att injicera en stark ström av fria neutroner då laddningen skall detoneras.

Uran av militär vapenkvalitet måste till minst 90 % bestå av den klyvbara isotopen U 235. Då naturligt uran innehåller ca 99 % U 238 och mindre än en procent klyvbart U 235, krävs således en komplicerad anrikning. Med låga krav på funktionssäkerhet och sprängkraft kan dock primitiva fissionsladdningar troligtvis konstrueras även med uran av väsentligt lägre anrikningsgrad. Plutonium finns inte i naturen utan måste framställas genom bestrålning av naturligt uran i en kärnreaktor. Restprodukten från processerna, det ”utarmade” uranet 238 (eng. ”Depleted Uranium”), används till tampers i kärnvapen, barlast i flygplan och andra farkoster, samt i viss kaliberbunden pansarbrytande ammunition. Pansargranater med utarmat uran är tunga och ger ofta god restverkan i målet eftersom finfördelat och upphettat uran från projektilanslagen är pyrofort, dvs har förmågan att självantända i luft (se även avsnitt 3.1.3, ”Pilprojektilers uppbyggnad”)

De flesta fissionsladdningar är konstruerade antingen enligt kanonmodellen eller enligt implosionsmodellen. Implosionsmodellen är svårare att konstruera men fungerar både för uran och för plutonium, emedan den enklare kanonmodellen endast lämpar sig för uran, se *Figur 7.2*. Rena fissionsladdningar kan maximalt konstrueras för ca 100 kt sprängkraft, för att inte riskera kritisk massa i förtid. ”Verkningsgraden” är ca 17 kt sprängkraft per fissionerat kilo uran eller plutonium.



Figur 7.2. Principskiss av kanonmodellen och implisionsmodellen. (Illustration: Samuel Svärd. Källa:FOI)

7.3.2 Fusionsladdningar – ”vätebomber”

Fusion innebär att atomkärnor i vissa lätta grundämnena kan smälta samman – fusionera – till nya tyngre ämnen under utsändandet av energi. Reaktionen kräver oerhört högt tryck och temperatur – flera miljoner grader, varför fusionsladdningar också kallas termonukleära. För att kunna övervinna den repellerande kraften mellan de positivt laddade protonerna i atomkärnorna och starta fusionen krävs energin från en fissionsladdning som ”tändhatt”. Den energimängd som frigörs vid fusion är i gengäld många gånger större än vid fission – ofta i megatonklassen! ”verkningsgraden” är ca 80 kt per kg fusionerat material.

En välkänd fusionsprocess bygger på sammanslagning av väteisotoperna tritium (T) och deuterium (D) till helium (He), en fri neutron (n) och 17,6 megaelektronvolt energi. Ett konstruktionsproblem är att väteisotoperna vid rums-

temperatur är gaser, eller efter kraftig nedkylning vätskor, med låg densitet och således stor volym. För att kringgå detta används ett fast ämne litiumdeutrid (LiD) som fusilt material. Litiumatomerna kan nämligen av neutronbestralning omvandlas till tritium, som sedan kan fusionera med det närbelägna deuteriet i ämnet.

Själva laddningskonstruktionen bygger på att det fusila bränslet (LiD) placeras runt klyvbart material samt täcks med en mantel, t.ex. av uran 238, och placeras bakom ett skydd (inre tamper, t.ex. av U238) inom samma reflektorhölje (yttre tamper, t.ex. av U238) som en fissionsladdning. Arrangemanget fixeras ofta med plastsikum. Vid initiering kommer röntgenstrålningen från primärfissionen först att gå runt skyddet, studsas mot det yttre reflektorhöljet och "bränna bort" (abladera) manteln, vilket ger upphov till en slags komprimerande rekyleffekt som i kombination med trycket och värmen från den primära och inre fissionen uppfyller förutsättningarna för fusion. Den energirika neutronstrålning som utsänds från fusionen kan sedan i sin tur starta fission i den yttre reflektorns uran 238. Man har härmed fått en s.k. 3F-laddning (fission – fusion – fission). I en typisk termonukleär laddning frigörs ungefär hälften av energin från fission respektive fusion.

7.3.3 Fissionsladdningar med fusionsbidrag – "boosting"

Moderna fissionsladdningar är ofta förstärkta med en fusionskomponent i form av en centralt placerad blandning av deuterium och tritium (DT-gas). Denna har främst till uppgift att bidra med energirika neutroner för att öka "utbränningen" (verkningsgraden) hos det fissila materialet. Härvid åtgår mindre klyvbart material vilket medger konstruktion av små och kompakta laddningar med stor sprängkraft. Dessutom bidrar fusionen i DT-gasen i sig till att öka laddningens sprängkraft. Kärnladdningar som är konstruerade på detta sätt har ett "bäst före datum" p.g.a. att tritium har en halveringstid på 12,3 år. Således måste tritiumet i fusionsboostern ersättas med jämna intervall på kanske 5 år.

7.3.4 Verkansformer

Kärnladdningar verkar främst genom stötvåg (50 % av den ursprungliga energin återfinns som energi i stötvågen), värmestrålning (35 % av den ursprungliga energin återfinns som värmestrålning) och joniserande strålning (5 % av den ursprungliga energin återfinns som energi i initialstrålningen och 10 % som kvarvarande strålning). Härutöver tillkommer ljusblitz (bländning), elektromagnetisk puls (EMP) och psykologisk verkan. Generellt kan sägas att den dominerande verkansformen från stora kärnladdningar är värmestrålningen och från mindre den joniserande strålningen. Lagen om minskat utbyte gäller, dvs.

det krävs en ca 10 ggr så kraftig laddning för att dubblera verkansradien. Stöt-vågen har samma egenskaper som från en konventionell explosion men är av-sevärt kraftigare och varar längre. Värmestrålningen verkar genom att antända eller förkolna material.

Den elektromagnetiska pulsen uppkommer genom att initialstrålning från kärnladdningen "slår loss" elektroner från atomer i luften (compton spridning), vilka i växelverkan med det jordmagnetiska fältet ger upphov till en mycket kraftig EMP. Denna kan sedan inducera stora strömmar i elektriska ledare och materiel, vilka kan bränna sönder känslig elektronik inom stora områden.

Även den direkta initialstrålningen från explosionen kan skada känslig optisk och elektronisk materiel, men har sin huvudsakliga verkan mot levande varelser.

Initialstrålningen ger även upphov till inducerad aktivitet genom att normalt harmlösa atomer i omgivningen bestrålas, och därmed blir radioaktiva och börjar utsända joniserande strålning. Radioaktivt nedfall bestående av vapen-rester och stoft som inducerats kan färdas med vinden och kontaminera stora områden under lång tid.

7.3.5 Avstånd för direktverkan vid kärnladdningsexplosioner

Siffrorna i *Tabell 7.3* avser ungefärliga avstånd i meter från nollpunkten för kärnladdningsexplosionen för att försätta personal i olika skyddssituationer ur stridbart skick. Bokstäverna inom parentes anger dominerande verkansform: I = joniserande initialstrålning, V = värmestrålning, S = stöt-våg.

Tabell 7.3. Ungefärliga avstånd i meter från nollpunkten för kärnladdnings-explosionen för att försätta personal i olika skyddssituationer ur stridbart skick

| Skyddssituation | Laddningsstyrka | | | |
|--|-----------------|-------------|-------------|--------------|
| | 1 kt | 10 kt | 100 kt | 1 Mt |
| I det fria, helt oskyddad | 1 300 m (I) | 2 400 m (V) | 6 000 m (V) | 1 6000 m (V) |
| I det fria, med värmestrålningsskydd ("tät klädsel") | 1 300 m (I) | 1 800 m (I) | 3 400 m (I) | 8 000 m (S) |
| I öppet stridsvärn | 1 200 m (I) | 1 500 m (I) | 2 300 m (I) | 4 400 m (S) |
| I fältskyddsrum (m/"grupp-hjälms") | 200 m (S) | 500 m (S) | 1 200 m (S) | 3 000 m (S) |

7.3.6 *Neutronbomben*

Neutronbomben, eller ”bomb med förstärkt strålningseffekt” (enhanced radiation bomb, ER-bomb) är en liten fusions-bomb (vätebomb) där ett stort antal av de internt alstrade neutronerna inte fångas in utan tillåts stråla ut. Härigenom anses att kan man erhålla ett vapen vars tryck- och värmeverkan är mindre än den ”konventionella” vätebombens men med betydligt större verkan av neutronstrålning. Denna strålning kan också penetrera många mekaniska skydd. Tanken är att man skulle kunna oskadliggöra trupp utan att t.ex. byggnader förstörs. Stridsdelar enligt denna princip lär ha utvecklats i USA, även om de där sedan avvecklats, och i Kina⁷⁰. Stridsdelarna skulle kunna bäras av markroboten Lance eller skjutas ur grovkalibrigt artilleri (8 ”). Tveksamhet råder om huruvida principen fungerar eller ej.

70. news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/395689.stm

8. Biologiska och kemiska stridsmedel⁷¹

Biologiska stridsmedel utgörs främst av sjukdomsalstrande mikroorganismer – bakterier, virus och svampar – som avsiktligt sprids inom ett område för att slå ut människor eller nedsätta deras motståndskraft. Förutom i syftet att skada människor kan B-stridsmedel också sättas in mot husdjur eller grödor för att störa ett lands försörjning och ekonomi. I förhållande till de flesta andra stridsmedel är de biologiska både enkla och billiga att framställa. I mindre skala är produktion och hantering föga resurs- och lokalkrävande. På några dagar eller någon vecka kan man producera tillräcklig mängd material. Det innebär att också u-länder, terroristorganisationer osv. kan skaffa sig sådana stridsmedel. En begränsad framställning eller förberedelser för framställning kan lätt döljas och bara ett fåtal personer behöver känna till eventuella planer på att utnyttja B-stridsmedel. Framställning i större skala är tekniskt mer komplicerad. Men runt om i världen finns redan idag stora anläggningar för bakterie-, virus- och svampproduktion för tillverkning av vacciner, antibiotika och jäst. Under de senaste åren har anläggningar och tekniskt kunnande inom bioteknik och för storproduktion av t.ex. vacciner spritts till flera länder. Därmed har allt fler fått kunskaper om produktion och hantering av farliga smittämnen. Ett angrepp med B-stridsmedel kan ske antingen med hjälp av konventionella vapenbärare och spray aggregat eller genom sabotageinsatser. Det finns ett stort antal mikroorganismer som orsakar sjukdom. Alla kan dock inte användas som B-stridsmedel. Vissa krav måste nämligen uppfyllas för att ett angrepp med sådana ska vara effektiva. Den aktuella mikroorganismen måste bl.a. kunna produceras i tillräckligt stor skala, kunna överleva en tid i luft, vatten eller livsmedel och kunna ge upphov till en allvarlig men inte nödvändigtvis dödlig sjukdom. För

71. Texten utgör ett direkt utdrag ur ”FOI orienterar OM Nummer 2, 2002. *KEMISKA VAPEN – hot, verkan och skydd.*”

att uppnå avsedd effekt med ett B-angrepp kan angriparen behöva ha kännedom om skyddsnivå, vaccinations- och behandlingsmöjligheter, hygienstandard och motståndskraft hos befolkningen i det land som han avser att angripa. Det finns emellertid mikroorganismer med vitt skilda egenskaper som ger angriparen stora möjligheter att välja B-stridsmedel som passar en specifik situation.

Med dagens kunnande och med hjälp av genteknik är det möjligt att överföra egenskaper från en mikroorganism till en annan eller att modifiera befintliga egenskaper. Teoretiskt sett är det alltså möjligt att skraddarsy stridsmedel för varje specifik situation. Biologiska stridsmedel har flera unika och jämfört med andra stridsmedel annorlunda egenskaper:

- Verkan är inte omedelbar. Det kan dröja från timmar till veckor innan symptom börjar uppträda eftersom mikroorganismerna måste föröka sig i sin värd innan sjukdomen kan bryta ut. Det kan vara en nackdel – i jämförelse med direkt verkande vapen, exempelvis i en rörlig strid på taktisk nivå – men egenskapen kan i många fall utnyttjas av angriparen.
- Endast mycket små mängder behövs för verkan. Eftersom B-stridsmedel förökar sig i sin värd räcker det med en mycket liten infektions dos.
- B-stridsmedel kan ha. (men behöver inte ha) sekundär verkan, vilket innebär att smitta kan överföras till andra individer. En liten insats med smittsamma B-stridsmedel mot ett punktmål kan leda till en både geografiskt och i tiden utbredd epidemi.
- B-stridsmedel förstör inte materiel. Denna egenskap, som de delar med C-stridsmedel, innebär att byggnader och annan materiel inte förstörs eller skadas vid B-angrepp. Bara levande organismer påverkas. Vissa mikroorganismer producerar mycket farliga gifter, toxiner. Sådana kan också produceras av djur och växter samt framställas på kemisk väg. Till skillnad från organismerna som alstrar dem, kan toxiner inte själva fortplanta sig. Toxiner, som används i ren form militärt, klassas som kemiska stridsmedel. De intar dock en särställning bland C-stridsmedlen eftersom de omfattas av 1972 års konvention om biologiska stridsmedel och toxinvapen och konventionen om kemiska vapen från 1992. I skriften FOA informerar om C-vapen beskrivs toxiner och deras verkan utförligt (något mindre utförligt i avsnitt ovan).

8.1 Vad är kemiska stridsmedel, C-stridsmedel?

Enligt en FN-rapport från 1969 definieras kemiska stridsmedel som "... kemiska ämnen – antingen i form av gas eller vätska eller i fast form som skulle

kunna utnyttjas på grund av sina giftverkningar på människor, djur och växter ... ” Kenvapenkonventionen från 1997, vidgar begreppet kemiska vapen till att innefatta såväl giftiga kemiska substanser som deras utgångsämnen (prekursorer), samt ammunition och utrustning för utspridning. För att konventionen inte skall förbjuda enbart specifika ämnen, och därmed indirekt tillåta alla andra, innefattar den ett generellt förbud mot giftiga kemikalier. Med en giftig kemikalie avses i sin tur ”varje kemikalie som genom sin kemiska verkan på livsprocesserna kan förorsaka död, tillfällig prestationsnedsättning eller bestående skada på människor och djur”. Detta gäller oberoende av ämnens ursprung eller framställningsmetod. För att komplettera ovanstående ingår det i konventionen tre listor med kemikalier som täcks av definitionen. Toxiner, det vill säga gifter som produceras av levande organismer samt dessa gifters syntetiska motsvarigheter, klassas som kemiska stridsmedel om de används i strid med kenvapenkonventionen. Generellt intar toxiner en särställning eftersom de även omfattas av B- och toxinvapenkonventionen som trädde i kraft 1975. Tusentals giftiga ämnen är idag kända, men endast ett fåtal anses lämpliga för kemisk krigföring på grund av de krav som måste ställas på ett ämne för att det ska vara användbart som kemiskt stridsmedel. Ett 70-tal olika kemikalier har använts eller lagrats som C-stridsmedel i modern tid. Ett potentiellt kemiskt stridsmedel (agens) bör uppfylla följande krav.

- Det skall vara högtoxiskt men samtidigt ha sådana egenskaper att det är hanterbart för egna styrkor och vid produktion.
- Det ska vara lagringsbeständigt under lång tid i behållare utan att korrodera eller på annat sätt reagera med förvaringskärlet.
- Det bör vara relativt resistent mot vatten och syre, så att det inte förlorar sin effekt vid utspridning.
- Det ska tåla den värme som utvecklas vid utsprängningen om det används i bomber och granater etc.

Kemiska stridsmedel benämns ofta stridsgaser, en felaktig benämning som är historiskt betingad. Under första världskriget användes till exempel klorgas och fosgen, vilka är gaser vid rumstemperatur och normaltryck. De C-stridsmedel som är aktuella idag är endast i undantagsfall gaser. De som finns i kända lager är vanligen vätskor eller fasta ämnen. En viss mängd av ämnet befinner sig dock alltid i gasform, hur mycket beror på ämnets ångtryck som är temperaturberoende. Såväl fasta ämnen som vätskor kan dessutom spridas ut i luften i finfördelad form, så kallade aerosoler. En aerosol tas upp i kroppen via andningsvägarna på samma sätt som en gas. C-stridsmedel, såväl vätskor som gaser

och aerosoler, kan även tas upp via huden. Upptag av fasta ämnen genom hud är dock begränsat.

Kemiska stridsmedel kan klassificeras på många sätt. Man talar om flyktiga ämnen, som främst verkar i gasfas, respektive kvarliggande ämnen, som är svårflyktiga och därför framför allt belägger ytor. För att få en god markbeläggning vid utspridning från hög höjd med kvarliggande C-stridsmedel måste de utsprängda dropparna vara så stora att de faller ner inom målområdet och inte driver bort med vinden. Detta kan uppnås genom att man löser polymerer (t.ex. polystyren) i C-stridsmediet så att produkten blir högviskös (förtjockad). Följden blir att kvarliggningstiden och vidhäftningsförmågan ökar. Därmed försvåras sanering. Kemiska stridsmedel som främst används mot människor kan också indelas i dödande och prestationsnedsättande. Som prestationsnedsättande räknas i allmänhet ett ämne om mindre än 1/100 av den dödande dosen framkallar funktionsoduglighet t.ex. genom illamående eller synsvårigheter. Gränsen mellan dödande och prestationsnedsättande ämnen är inte absolut utan avser ett statistiskt genomsnitt. Som jämförelse kan nämnas att för nervgaser är kvoten mellan prestationsnedsättande och dödande dos ungefär 1/10. Man brukar även klassificera kemiska stridsmedel efter deras verkan på organismen. Det kan verka som om det skulle gå att skraddarsy ett C-stridsmedel för ett visst ändamål. Värt att beakta är att det emellertid alltid råder en viss osäkerhet om kvarliggningstid, utbredning och verkan.

8.1.1 Nervgaser

Bland de dödande C-stridsmedlen har, sedan andra världskriget, intresset fokuserats på nervgaserna. Dessa har fått sitt namn av att de påverkar impulsöverföringen i nervsystemet. Nervgaserna, som är vätskor vid normal temperatur och tryck, hör kemiskt till gruppen organiska fosforföreningar (OP-föreningar). De är förhållandevis stabila och lätta att sprida ut, högtoxiska och snabbverkande. Nervgaser kan tillverkas med relativt enkel kemisk teknik. Råvarorna är billiga och i regel lättillgängliga. Trots att utgångsämnen för de kända kemiska stridsmedlen kontrolleras efter särskilda regler av OPCW, kan kemiska vapen utvecklas dolt. De mängder av utgångsämnen som behövs är ofta små i relation till de mängder av dessa kemikalier som används i civil kemisk industri.

8.1.2 Senapsgaser

Senapsgaserna räknas vanligen till gruppen ”hudskadande C-stridsmedel” på grund av de brännskadeliknande sår och blåsor som de ger på huden. Med hänsyn till att senapsgaser också kan ge svåra skador på ögon, andningsvägar och inre organ borde de hellre benämnas ”hud- och vävnadsskadande C-strids-

medel". Vanlig senapsgas, bis(2-kloretyl)sulfid kan reagera med ett stort antal biologiska molekyler. Effekten av senapsgas är fördröjd och det tar timmar till dygn efter exponering innan de första symtomen uppträder. Senapsgas framställdes första gången 1822, men dess medicinska skadeverkningar upptäcktes först 1860. Som kemiskt stridsmedel användes senapsgas första gången under den senare delen av första världskriget. Ett mycket stort antal soldater skadades under dessa attacker. De fick hudskador och framför allt lungskador och ögonskador. Många av dem hade ännu 30-40 år senare kvarstående men, främst bestående ögonskador och kroniska besvär i andningsvägarna.

Under kriget mellan Iran och Irak under 1980-talet använde Irak stora mängder kemiska stridsmedel. Omkring 5 000 iranska soldater rapporteras ha blivit dödade, varav 10-20 procent av senapsgas. Till detta kommer tiotusentals skadade. Ett typiskt resultat av krigföring med senapsgas är att sjukvårdsapparatens belastas med många skadade som behöver lång och resurskrävande vård. Även i vår direkta närhet inträffar incidenter där personer riskerar att skadas av senapsgas. Det är fiskare som utsätts för senapsgas som följt med fiskeredskapen upp på båten. Bakgrunden är den dumpning av kemiska stridsmedel som gjordes efter andra världskriget i farvattnen utanför danska och svenska kusten. Vid många fiskehamnar i Sydsverige och Danmark finns en beredskap att ta hand om skadade personer och sanera utrustning som kontaminerats med senapsgas. Även på fiskefartyg finns viss sådan beredskap. Senapsgas är mycket enkelt att framställa och kan därför vara "ett första val" när ett land vill bygga upp en kapacitet för kemisk krigföring. .

I rent tillstånd är senapsgas färglös och i det närmaste luktlös. Namnet senapsgas har den fått genom en äldre produktionsmetod som gav en oren, senapslukande produkt. Senapsgas påstås också ha en karakteristisk lukt som påminner om rutten lök. Luktsinnet bedövas emellertid efter endast några få andetag så att lukten inte längre kan urskiljas. Senapsgas kan dessutom orsaka skador på andningsvägarna i koncentrationer som är så låga att det mänskliga luktsinnet inte kan uppfatta dem. Senapsgas är vid rumstemperatur en vätska med måttlig flyktighet och den är mycket stabil vid lagring. Smältpunkten för ren senapsgas ligger vid 14,4° C. Under andra världskriget tillverkades en klubbig senapsgas med hög viskositet genom tillsats av en polymer. Detta är det första kända exemplet på ett så kallad förtjockat C-stridsmedel.

Senapsgas är löslig i de flesta organiska lösningsmedel, men lösligheten i vatten är ringa. Klorkalk och kloraminer reagerar däremot mycket häftigt med senapsgas, varvid ogiftiga oxidationsprodukter bildas. Dessa medel används därför för sanering av senapsgas.

Senapsgas kan i gas-, aerosol eller vätskeform ge skador på hud, ögon, andningsvägar och mag-tarmkanal. Även inre organ kan skadas, framför allt blodbildande organ, genom att senapsgas tas upp genom huden eller lungorna och

transporteras ut i kroppen. Karaktäristiskt för senapsgas är den fördröjda effekten. Senapsgas ger inga omedelbara symtom vid kontakt, utan det tar timmar till dygn innan symtom uppträder och man blir medveten om vad som hänt. Då har cellskador redan hunnit uppkomma. Symtomen på senapsgasförgiftning spänner över ett vitt spektrum. Lindriga skador innefattar ögonsveda med kraftigt tårflöde, hudrodnad, slemhinneirritation, heshet, hosta och nysningar. Dessa skador kräver normalt inte medicinsk behandling. Svåra skador som är inkapaciterande och kräver medicinsk vård kan vara ögonskador med synförlust, brännskadeliknande hudskador, kräkningar och grava andningssvårigheter. Den akuta dödligheten vid exponering för senapsgas är liten. Den dosering som behövs för att direkt döda en person vid inandning är t.ex. cirka 50 gånger större än den dosering som ger akut dödlighet vid förgiftning med nervgasen soman.

8.1.3 *Arsiner*

I arsenalen av kemiska vapen finns senapsgas (HD) blandad med lewisit (L), som är en arsenikförening, 2-klorvinyl-diklorarsin. Ren lewisit är en färglös vätska och producerades under första världskriget i syfte att användas som kemiskt stridsmedel. Hydrolysen i vatten är snabbare än för senapsgas, lewisit reagerar till och med fukten i luften och därför är ren lewisit inte särskilt användbar som kemiskt stridsmedel. På grund av detta har lewisit blandats med senapsgas i syfte att sänka fryspunkten hos senapsgasen. Blandningen kallas HL.

8.1.4 *Cyanväte*

Cyanväte brukar räknas till gruppen allmänförgiftande kemiska stridsmedel. Inga bekräftade uppgifter finns om att ämnet använts som kemiskt stridsmedel. Det har dock antytts att cyanväte skulle ha använts av Irak i konflikten mellan Irak och Iran under 1980-talet och mot den kurdiska befolkningen i norra Irak. Under andra världskriget användes en form av cyanväte, Zyklon B, som avlivningsmedel i nazisternas gaskamrar. Den höga flyktigheten gör att cyanväte förmodligen är svåränvänt som kemiskt stridsmedel i strid, eftersom det är svårt att uppnå tillräckligt höga koncentrationer utomhus. Däremot kan halten cyanväte snabbt bli dödligt hög om ämnet sprids i ett slutet utrymme. Risk för cyanidförgiftning föreligger vid inandning av brandgaser från bl.a. nylon och vissa plaster. Cyanväte är vid rumstemperatur en färglös vätska som kokar vid 26° C. Cyanväte har hög giftighet och är i tillräckliga koncentrationer snabbt dödande. Den viktigaste förgiftningsvägen är via inandning. Cyanväte tas effektivt upp via lungorna och stör mycket snabbt kroppens cellandning genom att hämma cellens metallinnehållande enzymer. De främsta målorganen

vid cyanidförgiftning utgörs av centrala nervsystemet och hjärtat. Cyanväte ger inte upphov till några lokala skador i luftvägarna. Både gas- och vätskeformigt cyanväte, liksom cyanid i lösning, kan dessutom tas upp via huden. Symtomen vid cyanidförgiftning varierar och är bland annat beroende av förgiftningsvägen, den totala dosen och den tid under vilken dosen erhålls. Har man inandats cyanväte är de första symtomen oro och ökad andningsfrekvens. Andra tidiga symtom är yrsel, huvudvärk, hjärtklappning och andningssvårigheter. Senare uppträder kräkningar, konvulsioner, andningsstillestånd och medvetslöshet. Om förgiftningsförloppet är snabbt, t.ex. vid mycket höga koncentrationer i luft, hinner inte några symtom utvecklas och exponerade personer kan då plötsligt falla ihop döda. Cyanid anses dessutom vara kraftigt inkapaciterande dvs. en förgiftning gör den utsatte så påverkad, vid betydligt lägre dosering än dödlig dos, att förmågan att handla rationellt avsevärt försämras. För cyanväte bedöms kvoten mellan inkapaciterande och dödande dos vara ungefär 1/10. Något medicinskt motmedel mot enbart cyanidförgiftning finns inte idag i det svenska försvaret. Den behandling som finns inom den civila sjukvården går ut på att underlätta och påskynda kroppens egen förmåga att utsöndra cyanid och att binda cyanid i blodet.

8.1.5 Tårgas

Tårgaser är den gemensamma benämningen på ämnen, som snabbt och i låga koncentrationer i gas- eller aerosolform orsakar sveda i ögonen, tårflöde och svårigheter att hålla ögonen öppna. Tårgaser irriterar ofta även luftvägar och ibland huden. Effekten av tårgas upphör relativt snabbt efter det att exponeringen upphört. De används huvudsakligen som militära övningsgaser och i polisiära sammanhang, men har också använts som kemiska stridsmedel. Till skillnad från människan har djur i allmänhet låg känslighet för tårgaser. Hundar och hästar kan därför användas vid polisiära insatser även när tårgas sätts in. Utvecklingen av tårretande ämnen tog fart under första världskriget där de prövades som kemiska stridsmedel. Först efter andra världskriget inleddes ett mer systematiskt letande efter effektiva ämnen. Av en lång serie ämnen har tre kommit att få större betydelse än de övriga. Dessa ämnen är kloracetofenon (CN), ortoklorbensylidenmalononitril (CS) och dibens[b,f]-1,4-oxazepin (CR). CN var tidigare den mest använda tårgasen. Den kommersiella produkten innehållande CN finns fortfarande kvar under namnet Mace®. CS har numera ersatt CN i stor utsträckning och torde vara den internationellt sett mest använda tårgasen. Användandet av tårgas innebär låga risker då de generellt sett har låg letal toxicitet. Noteras bör dock att ett fåtal dödsfall finns rapporterade efter exponering för CN. I Sverige används CS av polisen vid t.ex. upplopp samt av Räddningsverket och militären vid övningar och tillpassningskontroll av skyddsmasker.

Tårgaserna är vid rumstemperatur vita, fasta ämnen. De är stabila vid upphettning och har lågt ångtryck. De sprids därför i regel som aerosoler. Samtliga är svårösliga i vatten, men löser sig i ett flertal organiska lösningsmedel.

Gemensamt för alla tårgaser är att de nästan ögonblickligen ger ögonsveda, tårflöde och kramp i ögonlocken. Den kraftiga reteffekten leder till en mer eller mindre uttalad inkapacitering hos exponerade personer. Förutom effekterna på ögonen orsakar de flesta tårgaser även retning i näsa, munhåla, svalg och luftvägar. Även huden påverkas ibland, speciellt i fuktiga och varma partier. Vid massiv exponering kan den tårgas som sväljs även framkalla kräkningar. Obehagskänslorna vid tårgasexponering är så starka att man inte kan handla rationellt.

8.1.6 *Pepparspray*

Pepparspray (OC, Oleoresin Capsicum) utvecklades, som ett skydd mot aggressiva hundar, för postväsendet i USA på 1960-talet. En av fördelarna med pepparspray är att den, förutom ovanstående effekt på hundar och andra djur, också oskadliggör personer som är drogpåverkade eller mycket aggressiva. Tårgasen CS effekt har visat sig vara otillräcklig i vissa sådana fall. Den aktiva substansen i pepparspray är alkaloiden capsaicin (trans-8-metyl-N-vanillyl-6-nonenamid), som finns naturligt i pepparfrukter. En del tillverkare av pepparsprayer extraherar pepparfrukter och koncentrerar capsaicinet tillsammans med andra aktiva substanser. Andra tillverkare använder sig av syntetisk framställd capsaicin. Pepparspray sprids som aerosoldroppar. Capsaicinet verkar genom att frigöra signalsubstanser, däribland substans P, som förmedlar smärta. De receptorer som påverkas av capsaicin finns bland annat i munnen, näsan, ögonen och slemhinnorna. Verkan av pepparspray kvarstår längre tid än tårgaser (30-50 minuter), men behovet av sanering inomhus är mindre. Toxiciteten är bristfälligt utredd och misstanke om tiotals dödsfall i samband med användning finns.

8.1.7 *Psykokemiska stridsmedel*

Till gruppen psykokemiska stridsmedel brukar man räkna ämnen som i låga doser (< 10 mg) framkallar tillstånd som liknar psykisk sjukdom eller ger andra symtom från det centrala nervsystemet (bedövning, förlamning, stelhet osv.). Effekterna ska vara övergående och orsaka handlingsförlamning och stridsoduglighet. Då flera tänkbara ämnen skulle kunna komma ifråga ges här endast några exempel. Under 1950-talet studerade man ämnen av typen glykolsyrastrar (glykolater). Särskilt intresse riktades mot 3-kinuklidinylbensilat, BZ. Ämnesgruppen benämns även APS, atropinlika psykokemiska stridsmedel, eftersom deras effekter liknar dem som höga doser atropin ger upphov till. BZ

ger förgiftning vid totaldos om 0,5-5 mg. Perifera symtom i form av vidgade pupiller, försämrat närseende, muntorrhet och hjärtklappning uppträder efter cirka 30 minuter. En allvarlig effekt vid förgiftning med BZ, liksom med andra atropinlika ämnen, kan vara förhöjd kroppstemperatur. Senare uppträder medvetanderubbningar, hallucinationer och koma. Inkapaciterande sviter kan kvarstå 1-3 veckor efter förgiftningen. Då effekterna av glykolater visade sig vara svåra att förutsäga svalnade intresset för fortsatt forskning på denna typ av ämnen. I USA har man gjort fältförsök, där BZ spritts ut, men det finns inga belägg för att USA använt BZ i krigsinsatser. De amerikanska lagren är destruerade. Bosnienserbiska styrkor har anklagats för användning av atropinlika ämnen i samband med erövrandet av den muslimska enklaven Srebrenica. Inga bevis för BZ-användning har presenterats, men den federala jugoslaviska armén har haft atropinlika ämnen i ammunition och en doktrin för dess användning. Fencyklidin är ett ämne med bland annat analgetiska, bedövande, egenskaper. Symtom som förvrängd kroppsuppfattning, desorientering och livliga drömmar förekommer. Dessa symtom uppträder efter några timmar vid doser om 5-20 mg. Vid mycket höga doser (> 100 mg) finns stor risk för bland annat andningsdepression och död. Substansen, som är lätt att framställa och används i missbrukarkretsar, kan sättas till tobak och inandas vid rökning. LSD är sannolikt en av de mest verksamma hallucinogener man känner till. Ämnets kemiska stabilitet är dock mycket låg, varför det är mycket osannolikt som kemiskt stridsmedel. Det finns dock andra kemiska ämnen med LSD-liknande effekter. Dessa ämnen är kemiskt lika amfetamin och stabila. Teoretiskt skulle denna typ av ämnen kunna användas som kemiska stridsmedel i speciella sammanhang och spridas i form av en aerosol. Idag har ett av dessa ämnen under benämningen ”ecstasy” fått stor spridning hos deltagare i s.k. ravefester. Drogen förstärker upplevelserna av atmosfären vid dessa tillställningar, och ger brukaren känsla av välbefinnande och ökad uthållighet.

8.1.8 *Toxiner*

Toxiner är giftiga substanser som i naturen produceras av djur, växter eller mikroorganismer. De kan också framställas i laboratorier genom kemisk syntes eller med hjälp av molekylärbiologiska metoder. Deras struktur kan variera mycket, allt från enkla kemiska föreningar till polypeptider och proteinstrukturer. Toxinernas giftighet har stor inbördes variation. Botulinustoxin som produceras av bakterien *Clostridium botulinum*, har den högst kända toxiciteten, flera tiopotenser giftigare än nervgaser. Toxiner tilldrog sig militärt intresse redan under första halvan av 1900-talet. Storskalig tillverkning av bland annat botulinustoxin, stafylokok enterotoxin B, och ricin prövades och vapen och spridning testades. Då det oftast var svårt att tillverka tillräckligt stora mängder, mat-

tades dock intresset av. Flera av de toxiner som diskuterades då var känsliga för värme och ljus, vilket gjorde dem instabila och opraktiska. USA lade ner sitt toxinprogram i slutet av 1960-talet och förstörde sina lager av bland annat botulinustoxin. Historiskt sett har forskning kring toxiner framför allt syftat till att använda dessa substanser som vacciner, muskelavslappnande läkemedel eller cellgifter. Den snabba utvecklingen inom den molekylärbiologiska forskningen, med ökande kunskaper om toxiner och utvecklingen av gentekniska metoder, har dock förnyat intresset för toxiner som stridsmedel. Det är nu möjligt att producera toxiner med ökad giftighet och stabilitet. Dessutom kan de skyddas vid utspridning genom mikroinkapslingstekniker så att aktiviteten bibehålls. Vidare finns vaccin framtaget för exempelvis botulinustoxin vilket leder till möjligheten att, i vissa fall, skydda egna styrkor genom vaccination. Aerosol är det effektivaste spridningssättet eftersom de flesta toxiner i likhet med kemiska och biologiska stridsmedel har störst effekt när de andas in.

De flesta toxiner är instabila i basiska vattenlösningar, och förstörs alltså lätt med vanliga saneringsmetoder. Förgiftningar kan även ske via förtäring av mat och dryck. Spridning via vattenreservoarer ger utspädningseffekter som är för stora för att åstadkomma någon skada och flera toxiner förstörs dessutom i klorerat vatten.

- Bakterietoxiner

Botulinustoxin, som produceras av bakterien *Clostridium botulinum*, är det giftigaste ämne man idag känner till⁷². Bakterien är globalt spridd och då huvudsakligen i form av sporer, som under lämpliga syrefattiga förhållanden kan börja gro. Den vanligaste formen av förgiftning, botulism, är en matförgiftning som orsakas av felaktig behandling av matvaror. Toxinet är ett protein som finns i sju olika former.

- Marina toxiner

Många toxiner produceras av marina organismer eller av bakterier som finns i dessa. Ett exempel är de toxiner som framkallar paralytisk skaldjursförgiftning hos människa. Förgiftningssymtom vid lindriga fall av paralytisk skaldjursförgiftning är stickningar och känslobortfall vid munnen och fingertopparna, yrsel, huvudvärk och illamående. Allvarligare förgiftning ger symtom som andningssvårigheter och förlamning. Vid förtäring av toxinkontaminerade skaldjur kan

72. Botulinumtoxin används i en försvagad form under namnet *Botox* för förlamning av till exempel muskler och svettkörtlar vid vanligen icke-kirurgiska skönhetsingrepp och som behandling vid ymnig svettning och även mot skelning (Källa: <http://sv.wikipedia.org>)

symtom visa sig redan efter en timme och dödsfall kan inträffa inom två till tolv timmar om adekvat behandling inte sätts in. Ett av de mest potenta toxinerna som orsakar denna förgiftning är saxitoxin. Det produceras av dinoflagellater, vilka i sin tur utgör föda åt skaldjur. Saxitoxinet påverkar nervsystemet och andningen. Toxinet är giftigare vid inhalation än vid förtäring. Experimentella studier, där saxitoxin inhalerats, har påvisat dödliga skador redan inom några minuter.

- Växttoxin

Ricin är ett glykoprotein som produceras av ricinoljaväxten *Ricinus communis*. Det är i växtens bönor som ricin bildas. Toxinet inaktiverar cellens proteinsyntes vilket ofta leder till celledöd. Trots att ricin är betydligt mindre giftigt än t.ex. botulinustoxin så kan det utgöra ett potentiellt hot som toxiskt vapen, eftersom det är värmestabilt och lätt tillgängligt. Ricin är relativt enkelt att producera i större kvantiteter. Ungefär en miljon ton av bönan används årligen för produktion av ricinolja. Pressmassorna som blir över vid framställningen av oljan innehåller ungefär 5 % ricin. Symtom och sjukliga förändringar varierar efter en ricinförgiftning beroende på dosens storlek och hur exponeringen skett. Vid förtäring kommer symtom som illamående, magkramper och uppkastningar ganska snabbt. Senare kan förgiftningen ge kraftiga blödningar från mag- tarmkanalen, kramper, feber och blodtrycksfall. I allvarigare fall kan döden inträffa efter tre dygn eller senare. Efter inhalation av ricin kan andningssvårigheter uppkomma vilket kan leda till syrebrist i vävnaderna och i allvarliga fall döden. Vid det s.k. paraplymordet i London 1978 användes en ricinpreparerad kula för att avliva en bulgarisk avhoppare.

8.2 Utspridning av C-stridsmedel

Vapenteknologin har under det senaste århundradet utvecklats snabbt och blivit alltmer sofistikerad. Ökade kunskaper om nya material, explosivämnen, framdrivningsteknik, sensorer, styr- och reglerteknik, elektronik, systemteknik, aerodynamik etc. gör det möjligt att förse dagens vapensystem med stridsdelar av mycket olika utformning, däribland sådana som innehåller C-stridsmedel. Spridningstekniken måste anpassas till de olika ämnenas viskositet (de kan även vara förtjockade), flyktighet och giftighet för att erhålla optimal dosering. Utspridningen skall också ske så jämnt som möjligt på relativt låg höjd över ytan. Innehållet i C-ammunition kan spridas med följande tekniker:

Termisk teknik tillämpas med hjälp av pyrotekniska satser som förångar och driver iväg C-stridsmedlet. Detta kondenserar sedan och bildar en rök. Tillämpningar är t.ex. tårgasfacklor och granater.

Explosivämnesteknik. Vid explosiv utspridning uppstår både tryckvåg och värme. Ammunitionen är fylld med vätskeformigt eller fast C-stridsmedel och är i centrum försedd med sprängämne. Bomben, granaten eller minan är normalt utrustad med ett tändrör som utlöses av tid, höjd, tryck, anslag etc. För att få största verkan utformas tändröret så att utsprängningen av C-stridsmedel sker strax ovanför marken. Större ammunition med förtjockade eller svårflyktiga C-stridsmedel kan även sprängas på 1 500-2 000 m höjd och därigenom erhålla nedfall över ett relativt stort område. Vapensystem som utnyttjar explosivämnesteknik är t.ex. robotar, artilleri, raketartilleri, flygbomber och minor.

Aerodynamisk teknik. Detta innebär att projektilens hölje öppnas och den inneslutna vätskan splittras upp i vätskedroppar när den med hög hastighet träffas av fartvinden. Dropparna faller sedan ner i form av ett regn.

Sprayteknik innebär att vätskan pressas ut genom ganska grova munstycken i den bakre delen av projektilens mantel. Detta sker med hjälp av trycket från en innesluten gas eller tryck som alstras från fartvinden. När vätskan med hög hastighet utsätts för fartvinden sönderdelas den i mindre droppar vars storlek till stor del beror på hastigheten hos projektilen. Sprayning används främst i flygbomber eller i speciella spraytankar som bärs av flygplan eller helikoptrar, men kan även användas i t.ex. kryssningsrobotar och UAV. Vid beläggning med avlövningsmedel o.d. kan besprutningsplan eller helikoptrar användas som har en tvärgående ramp med spraymunstycken eller rotationsspredare. I detta fall pumpas vätskan ut till rampen och storleken på vätskedropparna bestäms till största delen genom munstyckenas utformning.

"Dusty Agents". Redan under andra världskriget experimenterade tyskarna med en distributionsmetod som brukar kallas "Dusty Agents" (DA). Genom att adsorbera det kemiska stridsmedlet till en mycket finpartikulär inert bärare (ofta kiselpartiklar) kan man erhålla nya egenskaper hos stridsmedlet. Bland annat sägs metoden betydligt försvåra detektion av C-stridsmedlet samt i vissa fall kunna penetrera skyddsdräkter. DA har fått förnyad aktualitet sedan Irak sägs ha använt senapsgas DA i konflikten med Iran. Terrorister och totalitära staters säkerhetsorganisationer har utarbetat olika metoder för att förgifta eller lönnmörda meningsmotståndare. En rad olika metoder för detta ändamål har utarbetats:

- ett gasdrivet gevär inbyggt i ett paraply eller i en spatserkäpp. Den lilla genomborrade kulan är fylld med gift och överdragen med ett vaxlager som upplöses vid kroppstemperatur
- skruvmejslar med en dold injektionsspruta för gift
- ringar med injektionsnålar
- chokladkonfekt preparerad med cyanid

- drycker (whisky och öl) spetsade med toxiner, tungmetaller⁷³ (och smittämnen)
- förgiftning av mat och vatten i allmänhet
- kläder som indränkts med gift
- punkterade behållare med nervgas som rinner ut på marken och avdunstar
- sprayning av giftig vätska i luften

8.3 Skydd mot C-stridsdelar

Det moderna samhällets beredskap för, och skydd mot, angrepp med kemiska stridsmedel bygger på en kedja av riskbedömning, planering och åtgärder på en rad olika organisatoriska nivåer. På internationell nivå utgör nedrustningsarbetet, med kemvapenkonventionen från 1997, en hörnsten i det sammanhanget. Konventionen, som är det första heltäckande multilaterala nedrustningsavtalet, innebär att riskerna för storskaliga angrepp med kemiska stridsmedel minskar efter det att ratificerande länder genomfört destruktion av befintliga lager av kemiska stridsmedel. Hot om småskalig användning kvarstår dock liksom hot från eventuellt nya kemiska stridsmedel, kemikalier och kemiska produkter. Utöver de exportrestriktioner som finns inom kemvapenkonventionen finns ytterligare exportkontrollorgan som bidrar till att minska spridningen av teknik och utrustning relaterade till massförstörelsevapen. På nationell nivå omvandlas Sveriges militära försvar från ett invasionsförsvar till ett insatsförsvar som efterhand anpassas till nya förutsättningar där skydd mot CBRN-stridsmedel är en viktig strategisk kompetens

Kunskap och utbildning är av yttersta vikt för att skyddskonceptet ska fungera i praktiken. Att i varje situation ha tillgång till rätt skyddsutrustning och vara väl förtrogen med den är en grundläggande förutsättning för ett fungerande skydd. Vidare måste kunskap om hur man uppträder i C-miljö, den tid man kan verka under olika klimatbetingelser, hantering av indikeringsinstrument, indikeringstaktik, rutiner för sanering, etc. finnas i organisationen. Skyddet mot C-stridsmedel brukar normalt sägas vila på fem ben:

- Fysiskt skydd (PP=Physical protection)
- Medicinskt skydd (MC=medical countermeasures)
- Detektion, Identifikation och Övervakning (DIM=detection, identification and monitoring),

73. Tungmetall används här i en vidare, mindre specifik, betydelse än tidigare.

- Hazard management (HM) (finns ingen bra svensk översättning) samt
- Varning och rapportering (WR= Warning and reporting)

8.3.1 Fysiskt skydd

Ett anfall med kemiska stridsmedel får maximal effekt när det riktas mot oskyddade personer. Redan genom relativt enkla skyddsåtgärder kan man väsentligt minska skadeverkningarna. Det är i princip möjligt att skapa ett heltäckande fysiskt skydd mot kemiska stridsmedel (C-skydd), men bland annat av kostnads-skäl får man oftast acceptera en lägre nivå. Det fysiska skyddet kan utformas på olika sätt. Det kan antingen bestå av ett personligt skydd i form av andnings-skydd i kombination med kroppsskydd eller av ett kollektivt skydd.

8.3.2 Personligt skydd

För att åstadkomma ett effektivt personligt C-skydd måste någon form av ”barriär” byggas upp kring individen, men ju bättre avskärmning som byggs upp mot omgivningen desto mer inkräktar man på förmågan att verka och agera. Under ett pågående anfall med C-stridsmedel måste andningsvägarna skyddas mot aerosol och gas i luften, samt kroppen i övrigt mot direkt kontakt med C-stridsmedel i form av vätskeformiga och fasta partiklar. Efter anfallet måste man skydda sig mot kontakt med C-stridsmedel på mark och materiel och mot gas som avdunstar därifrån. Skydd för andningsvägarna Nivån på det skydd som en skyddsmask kan ge mot inträngning av B- och C-stridsmedel genom andningsvägarna är beroende av:

- förvarning
- tid för påtagning av skyddsmasken
- filtrets förmåga att ta upp stridsmedlet
- inläckning

Redan inom 5-10 sekunder efter ett C-anfall kan C-stridsmedlet nå fram till personerna på marken. Det kan då vara antingen i form av vätskedroppar som träffar huden eller klädseln, eller som ett gas- eller aerosolmoln. Redan några andetag från ett sådant moln kan ge en skadlig eller dödande dos. Om man utsätts för ett överraskande anfall är det därför livsviktigt att snabbt få på skyddsmasken så att den tätar mot ansiktet. Bästa skyddet mot överraskande attacker får man genom att ständigt bära någon form av andningsskydd. Ett krav som ofta ställs på en modern militär skyddsmask är att den ska kunna bäras under

minst ett dygn. Man har därför inriktat sig på att utveckla skyddsmasker som är så komfortabla som möjligt. Detta har man kunnat uppnå dels genom att göra en bred och följsam tätningskant, dels genom att minska den fysiologiska belastningen. Inandningsmotståndet har minskats genom att luftmotståndet i filtret nedbringats. Masken bör också vara utrustad med någon form av drick-anordning.

Andra utmärkande drag hos nyare typer av skyddsmasker är ett stort synfält och mycket liten inläckning, som i sin tur innebär god skyddsförmåga. Trots detta kommer ändå en liten andel av användarna att få ett otillräckligt skydd. Orsaken kan vara avvikande ansiktsform eller bristande förmåga att ta på sig masken på bästa sätt. Genom bättre utbildning och träning kan denna andel minskas, men aldrig helt elimineras. En anordning för talkommunikation ingår i alla nyutvecklade masker. Den tidigare lösningen, talmembran, har börjat ersättas av talhorn eftersom detta är enklare att tillverka. Ett talhorn ger också i stort sett samma ljudtransmission som ett talmembran. Nya material för filter-behållarna, exempelvis fiberarmerad plast, har gjort att de bättre motstår hårda yttre påfrestningar.

Nya tekniska lösningar på problemet att kombinera skyddsmask och glasögon finns, vilka medger korrektion av synfel utan att skyddet därigenom försämras. En skyddsmask måste kunna anpassas till olika ansiktsformer och tillverkas därför i ett elastiskt material. Numera är nästan alla masker tillverkade av något gummimaterial. Om man ställer höga krav på god skyddsförmåga mot permeation (genomträngning) av C-stridsmedel, innebär detta oftast att man väljer ett halogenerat butylgummi. Ett skyddsmaskfilter består av två delar: ett aerosolfilter och ett gasfilter. Aerosolfiltret är vanligtvis uppbyggt av ett skikt av glasfibrer, där avståndet mellan fibrerna är stort i förhållande till storleken hos de partiklar som ska filtreras. Ett sådant aerosolfilter arbetar därför inte genom att sikta eller sila bort partiklarna. Partiklarna avlägsnas främst då de kolliderar med fibrerna och fastnar. Om det är ett flyktigt ämne som fastnar, kan det sedan avdunsta från aerosolfiltret. Det är därför viktigt att konstruera ett filter så att gasfilterdelen placeras efter aerosolfiltret. Adsorbenten i gasfiltret består av aktivt kol.

På senare tid har även andra adsorbenter, som olika syntetiska polymerer och zeoliter, provats. Ingen av dessa nya adsorbenter har dock visat sig lika generellt användbara som aktivt kol. Inga andra adsorbenter har heller visat sig ha högre upptagningsförmåga för C-stridsmedel än aktivt kol. Under senare tid har filtergångorna standardiserats så att militära och civila filter i de flesta fall kan användas på samma mask. Graden av genomläckning i moderna filter är högst 0,001 procent och filtren skyddar mot i extrema fall minst 10 men sannolikt upp till 100 anfall, innan C-stridsmedel börjar läcka igenom. Om skyddsmasken används i icke kontaminerad atmosfär belastas dock så småning-

om filtret genom att det tar upp fukt och föroreningar ur luften. Vid långvarig användning eller olämplig lagring kan detta leda till att skyddsförmågan mot vissa C-stridsmedel försämras.

För allmänheten finns andningsskydd som i första hand skall utgöra ett skydd under förflyttning till eller från ett kollektivt skydd eller under utrymning. Därför är allmänhetens skyddsmasker (folkskyddsmasker) av enklare utförande än räddningstjänstens och militärens masker. Folkskyddsmaskerna kan utnyttjas för alla åldersgrupper ned till fyra-fem års ålder. För yngre barn finns en barnskyddsjacka som ger ett visst skydd mot C-stridsmedel i vätskeform och även skyddar andningsorganen. En batteridrivna fläkt trycker luft genom ett filter och den reade luften strömmar framför barnets ansikte. Barn som är yngre än ett år kan skyddas i en barnvagnsinsats. Något äldre barn, som ännu är för små för att acceptera barnskyddsjacka eller skyddsmask, bör ges någon form av kollektivt skydd.

En omprövning av allmänhetens tillgång till skyddsmaterial pågår. Frågeställningar som beaktas är bl.a. om befolkningen inom tätorter/områden med förhöjd risk ska få tillgång till folkskyddsmasken även i fredstid. Den förhöjda risken kan utgöras av närheten till vissa kemiska industrier eller närheten till transportleder där stora mängder farligt gods transporteras. Skydd mot C-stridsmedel i vätskeform Det direkta C-anfallet ger inte bara upphov till gas och aerosol utan också vätskedroppar, som via huden tränger in i kroppen. Enbart andningsskydd är därför inte tillräckligt, utan detta måste kompletteras med ett kroppsskydd. Den mängd ämne, som absorberas av huden, bestäms av följande faktorer:

- typ av C-stridsmedel,
- tiden innan saneringen påbörjas,
- effektiviteten hos saneringsmedlet,
- den kontaminerade ytans storlek och typ av beklädnad

En förutsättning för att många ska överleva ett direkt anfall med C-stridsmedel i vätskeform är antingen att hela kroppsytan snabbt kan skyddas genom övertäckning eller att det finns ett inbyggt skydd i klädedräkten. Skydd genom övertäckning tjänar två syften: i första hand ska det förhindra att vätskedroppar träffar bar hud, men det ska även minska behovet av efterföljande sanering av den personliga utrustningen.

De äldsta typerna av skyddsdräkter mot kemiska stridsmedel består av gummidräkter som, tillsammans med handskar och stövlar, täcker hela kroppen med undantag av det parti som skyddas av skyddsmasken. En sådan dräkt bru-

kar karakteriseras som impermeabel (ogenomsläpplig). Detta syftar då inte bara på att C-stridsmedel inte ska kunna tränga igenom dräktmaterialet, utan framför allt på att svett som avges från huden inte heller kan passera igenom. Att vistas någon längre tid i en sådan dräkt kan därför bli mycket påfrestande. I ett varmt klimat blir den möjliga vistelsetiden mycket kort (10-20 minuter). För att minska värmebelastningen har man tagit fram permeabla (genomsläppliga) dräkter. I dessa finns ett skikt av finfördelat aktivt kol antingen bundet i polyuretanskum eller i form av kolkorn bundna mellan två textila lager. Ett sådant skikt med aktivt kol tillåter vattenånga som avges från kroppen att passera. Det aktiva kolet tar upp C-stridsmedel och hindrar det därigenom från att passera in till huden. Dessa kolskikt används aldrig ensamma utan kombineras med olika textila material.

En modern C-stridsdräkt är uppbyggd av permeabla material. Den är ofta utformad på samma sätt som en fältuniform. Största skillnaden är att det under det impregnerade yttertyget finns ett skikt med aktivt kol på en lämplig bärare. C-stridsdräkten kan användas i stället för en fältuniform eller som ett överdrag utanpå uniformen. Ett alternativ är att använda ett underställ med ett kolskikt som bärs under någon form av yttre skydd, oftast består detta av ett textilt material. Vid strid i C-vätskemiljö krävs alltid C-stridsdräkt. De impermeabla (ogenomträngliga) C-skyddsdräkterna kommer även i fortsättningen att användas i svårt kontaminerade miljöer, till exempel vid sanering. Värmebelastningen kan minskas genom att dräkterna ventileras med fläktar. Denna lösning är dock alltför sårbar för att kunna användas av stridande soldater. För att åstadkomma ett kortvarigt C-skydd kan överdrag tillverkade av olika plastmaterial användas. Även det civila försvaret har ett uppgiftsanknutet skydd. För civila räddningsenheter, liksom för annan personal inom totalförsvaret med aktiva utomhusuppgifter, gäller samma krav på skyddsmaterielen som för försvarsmaktens personal.

8.3.3 *Kollektivt skydd*

Med skyddsmask och speciella kläder kan en enskild individ ges ett adekvat C-skydd. I många fall kan en grupp personer i stället använda kollektiva skydd, t.ex. i tält, fordon eller i speciella skyddsrum. Personer under tak, exempelvis inomhus eller i täckta fordon, är inte enbart skyddade mot C-stridsmedel i vätskeform. De får också ett visst initialt skydd mot aerosol och gas, eftersom luftomsättningen i sådana utrymmen är låg. Koncentrationen stiger därigenom långsammare och det blir inte lika bråttom att ta på sig skyddsmasken. Luften till skyddsrum renas på i princip samma sätt som till skyddsmasken. Luften sugs med hjälp av en fläkt genom ett aerosolfilter och ett skikt med aktivt kol. Gränssättande för vistelsetiden i ett skyddsrum är oftast temperaturen. Ju fler

personer som vistas i rummet, desto mer stiger temperaturen. Normalt leds en del av denna värme bort genom skyddsrummets väggar, golv och tak samt en del genom fortlöpande ventilation av skyddsrummet. Ventilationssystemets kapacitet är anpassad så att klimatet blir uthärdligt vid olika årstider och med normal beläggning. I viktigare och större skyddsrum finns två ventilationssystem. För fredsventilation används en relativt hög luftomsättning, upp till 10 m³ per person och timme. En lägre luftomsättning med filtrerad luft används i BC-fallet; 1,5-3 m³ per person och timme.

Med avstängt ventilationssystem begränsas vistelsetiden i skyddsrummet genom att halten av syre i skyddsrumsluften minskar samtidigt som koldioxidhalten stiger. Gränsen för överlevnad kan sättas vid en lägsta syrehalt om 15-13 %, medan högsta gräns för koldioxid ligger vid högst 4-6 %. Gränserna uppnås nästan samtidigt efter cirka 6-8 timmar vid normal beläggning. Svårlosta problem kommer att uppstå om personal som utsatts för C-stridsmedel vill komma i skydd under pågående C-anfall eller strax efter detta. De som redan vistas i skyddsrummet utsätts för stora risker om någon passerar in genom gasslussen från ett område belagt med kvarliggande C-stridsmedel. Ska detta ske måste personen saneras. Går inte detta får inpassering ej ske. För allmänheten finns, i händelse av krig, tillgång till kollektiva skydd i form av skyddsrum. Skyddsrummen finns företrädesvis i tätorter. Skyddsrummens utbyggnad har sin utgångspunkt i hotet från en stor och massiv fientlig insats. Idag utgörs hotet främst av angrepp med hög precision och stor sprängkraft, vilket har minskat skyddsrummens betydelse. Den fortsatta utbyggnaden reduceras därför till ett minimum.

8.3.4 Kollektivt skydd i fordon

Det finns idag två sätt att utforma ett permanent kollektivt skydd i stridsvagnar och andra stridsfordon. Ett är att använda relativt täta fordon i kombination med tillförsel av renad luft som skapar ett övertryck gentemot omgivningen. Övertrycket måste kompensera det tryck som orsakas av vind och fartvind. Därför krävs det mer tillförd luft än vad besättningen behöver i andningsluft. Skyddstiden blir lång. Fördelen med denna lösning är att man slipper bära skyddsmask, vilket gör det betydligt lättare att använda optiska instrument. För att lämna fordonet i en kontaminerad miljö krävs personligt skydd. Behöver man senare återvända till fordonet är det svårt att undvika att kontaminera detta och personlig skyddsutrustning måste därför användas. Det andra är ett så kallat hybridssystem, och består av en kombination av kollektivt övertryck och tillförsel av centralt filtrerad luft via slang till individuella masker. Fordonsbesättningen kan då verka i kontaminerad miljö utan masker intill dess att luckan öppnats, eller ersättningsutrymmet penetrerats med vapenverkan. Om så sker måste de individuella maskerna med luftmatning tas på. Om fordo-

net inte är utrustat med kollektivt skydd, återstår endast att använda personlig skyddsutrustning. Detta är inte något bra alternativ eftersom man måste bära både C-stridsdräkt och skyddsmask för att få ett tillräckligt bra skydd. Speciellt vid hög yttre temperatur kan då den fysiologiska belastningen bli synnerligen besvärande. Man måste också använda en skyddsmask som är anpassad för användning tillsammans med optiska instrument.

8.3.5 Medicinskt skydd

Nervgaser verkar mycket snabbt. För att medicinska mot åtgärder ska vara meningsfulla måste de sättas in omedelbart. Därför finns i det svenska försvaret en automatisk spruta med nervgasmotmedel, autoinjektor, innehållande två aktiva komponenter HI-6 (500 mg) och atropin (2 mg). Autoinjektorn är så lätt att använda att varje soldat kan ge motmedel intramuskulärt, antingen till sig själv eller till en skadad kamrat. Om tillståndet efter den första injektionen inte förbättras inom tio minuter kan man, på skadeplatsen, ge den drabbade ytterligare en injektion med autoinjektor. Därefter behandlas den skadade av sjukvårdsutbildad personal, som i första hand injicerar ytterligare atropin och ett kramplösande medel, diazepam. I det svenska försvaret finns också medicinska motmedel som tas i profylaktiskt (förebyggande) syfte. Dessa är i tablettform och ska endast intas på order. Den ena tabletten innehåller en karbamat, pyridostigmin, som aktiv komponent. Som förbehandling ges som regel också en tablett diazepam (t.ex. valium), som främst verkar i det centrala nervsystemet. Förbehandlingen får bäst effekt om ett förvarningssystem finns och fungerar, eftersom tabletterna börjar verka cirka en halvtimme efter att de svalts. Den bästa skyddseffekten uppnås efter cirka två timmar och avklingar sedan. Diazepamets effektivitet minskar efter en längre tids förbehandling. Detta medför att en högre dosering krävs för att erhålla samma effekt. I Sverige pågår därför en översyn av det medicinska skyddet eftersom Sverige i allt större omfattning deltar i olika internationella insatser där en längre tids förbehandling kan bli nödvändig. Målet är att kunna ersätta diazepamtabletterna i förbehandlingen med något läkemedel som med samma skyddande effekt kan ges efter nervgasförgiftningen.

9. Graderad verkan och ”icke dödande vapen”

”Vapensystem med graderad verkan” (VGV) utvecklas mot de behov och erfarenheter som erhållits efter genomförda internationella insatser. ”icke dödande vapen” (IDV), ”Non-Lethal Weapons” (NLW), även ”Less than Lethal Weapons” (LLW) är delar av området. Målet är att i varje situation ha möjlighet välja såväl verkansform som grad av uppnådd effekt i målet.

Ur stridsdelssynpunkt är graderad verkan en stridsdel på vilken man kan ställa in nivån på slutverkan från ”less lethal” till ”full verkan” t.ex. punktmålsbekämpning utan kollaterala skador till full ytmålsverkan.

”Vapensystem med graderad verkan” definieras här som system, vilka man har möjlighet att påverka så att verkansform eller verkanskraft kan varieras och anpassas till mål, miljö och aktuellt behov.

En stor effektinsats ökar risken för oavsiktliga skador (”collateral damage”), omvänt ökar naturligtvis omgivningens säkerhet. Med VGV är målet att ”riskfritt” bekämpa alla mål beroende på deras egenskaper och närmiljö. Internationellt tar man fram nya tekniker och metoder för att bättre kunna stödja internationella fredsinsatser.

Strävan att genomföra framtida konflikter med ett större hänsynstagande, även till motståndarens förluster, medför att utvecklingen av framtidens vapensystem inte kan ske enbart från ett rent tekniskt perspektiv. Risken för civil närvaro i stridszonen har ökat⁷⁴.

Internationellt har utvecklingsinsatserna ökat avseende medel och metoder för tillämpning av IDV-tekniker. Fokus har gradvis vidgats från att stödja internationella insatser till verktyg för att öka effektiviteten vid strid i bebyggelse, minröjning och terroristbekämpning.

74. ”4th Generation Warfare”, Alan R. Shaffer, Director, Plans and Programs, Office of the Directors, Defense Research and Engineering, US DoD. Konf. ”NLW”, IDGA, Alexandria, VA, US, 2003-02-25--26.

”Precision Engagement (Effect)”-förmågan (PE) har gradvis ändrat valör mot ”Dynamic Effect” (DE). Man kan uppfatta en skillnad mellan den amerikanska tolkningen – ”precision guidance” och den i Europa förhärskande uppfattningen – ”precision effects”⁷⁵. USA använder nu termen ”Scalable Effect Capability” (SEC)⁷⁶

9.1 Graderad vapeninsats

Målet är att finna tekniker för att kunna bekämpa aktuella mål med en efter målets egenskaper anpassad, valbar och precis verkansform.

Förväntningarna är att en vapeninsats kan ske precist och kliniskt utan egna förluster. För att åstadkomma detta finns ingen patentlösning att tillgå. Asymmetriska förhållanden, styrka, teknisk nivå och stridstekniska metoder, kan medföra att antalet singulära, okvalificerade mål ökar. Utveckling av vapen och stridsdelseffekt måste ske korrelerad till förmågan att bestämma målets egenskaper.

Sensorutvecklingen ger förutsättning för att kunna realisera vapen med intelligenta verkansformer bl.a. genom ökad förmåga att klassificera och identifiera mål och därmed bestämma en optimal träffpunkt eller välja verkansform med hänsyn till målets arkitektur och skyddsnivå. FOI har genomfört studier och försök av s.k. adaptiva stridsdelar⁷⁷ (se även avsnitt 4.4).

Avpassad verkan kan tekniskt uppnås genom att möjliggöra val av:

| | |
|--------------------------|---|
| Träffpunkt | <ul style="list-style-type: none"> • Omvänt zonerörsfunktion • Valbar verkansyta |
| Verkansräckvidd | <ul style="list-style-type: none"> • Valbar splittertäthet • ”Temperbar” handvapenammunition |
| Verkansutformning | <ul style="list-style-type: none"> • Geometriutformning • Separata delladdningar |
| Verkansriktning | <ul style="list-style-type: none"> • Vridbart splitterskal • Sektorindelad laddning |
| Effekt | <ul style="list-style-type: none"> • Valbar splitterstorlek • Valbar splitterhastighet • T.ex. flera verkansmoder mot hårda mål i en stridsdel |

75. Konferens ”Precision Engagement”, RUSI, London 2000-10-11--12.

76. NDIA “Mines, Demolition and Non-Lethal Conference”, Tampa, FL, 2002-06-03--05.

77. FOA-RH--99-00473-310, ”Adaptiva stridsdelar med flermålskapacitet för olika vapensystem”.

Kriterierna för ett optimalt val av bekämpningsmedel (vapeninsats och verkansform) för ett mål är motsägelsefulla. Kravet på snabb insats står mot lång bantid vid stora skjutavstånd. Målens skyddsnivå, antal, utsträckning och storlek påverkar valet av verkansdel från stridsekonomisk utgångspunkt. Om bekämpningen syftar till materiell förstörelse är en stridsdel optimerad för psykiska effekter i humanmål mindre rationell. Risken för oönskad skada, bör även medge val av verkansdel med hänsyn till sidoverkan.

Möjligheten att utnyttja tillgängliga våldsmedel är inte sällan begränsade vid internationella insatser. Nationella politiska ställningstaganden kan dessutom medföra inskränkning av möjligheten att agera offensivt. "Rules of Engagement" (RoE) bestämmer begränsningar att agera, i vissa avseenden beroende på avsaknad av adekvata insatsmedel, samtidigt som parterna inte alltid är tydligt urskiljbara.

9.2 Målbestämning

Förmågan att bestämma målets läge tillräckligt noggrant är avgörande för verkan. Detta har också varit den största felkällan. Möjligheten att välja insatsform med hänsyn till avsett syfte och målets egenskaper ökar kravet på exakt målbeskrivning. Förutom målläge tillkommer kravet att kunna bestämma verkansdelens optimala träffpunkt. Det taktiska syftet, krav på uppnådd effekt, kombineras med en tillförlitlig verkansform. Då risken för oavsiktlig skada är stor, är det väsentligt att kunna avbryta en redan inledd vapeninsats.

Ett framtida sensorsystem måste kunna försörja varje presumtiv verkansenhets med högupplöst information avseende t.ex.

- Måltyp,
- Egenskaper,
- Geodetiskt läge (m-dm),
- Önskat träffpunktsläge (dm),
- Tidsförhållanden (s),
- Exponeringstid (s),
- Optimal tidpunkt för träff

9.3 Allmänt om "icke dödande vapen"

Oskyddade civila eller upprorsmakare, som endast är beväpnade med primitiva vapen, t.ex. stenar eller plankor, borde inte förorsaka några problem för en mo-

dernt utrustad militär styrka? Förmågan att agera begränsas dock av att steget mellan de medel som idag står till buds, förhandling alternativt vapenmakt, är för stort.

Försvarsmaktens definition av ”icke dödande vapen” (IDV):

Vapen, ammunition och annan materiel, som konstruerats och utvecklats i det uttalade syftet att oskadliggöra eller hindra individer, med låg risk för dödsfall eller permanent personskada, eller oskadliggöra materiel, med minimal oönskad effekt och påverkan på miljön.

Utvecklingen av ”icke dödande vapen” (IDV) har tydliggjort att det inte endast är tekniken som medger förmåga till insats. Varje studerat scenario kan beskrivas av unika faktorer liksom mål och syfte med insatserna.

Vad som regleras i internationella, nationella lagar samt ”Rules of Engagement” (ROE) påverkar en insats med hänsyn till situationens övriga ramfaktorer. Vem är ”turist” respektive ”terrorist”? Hur uppfattar motståndaren icke dödande våld med hänsyn till religion, kultur, aggressionsnivå etc.?

Nya tekniker prövas för att uppnå icke dödande effekter. Vilka skador uppstår på grund av de nya verkansformerna (trubbigt våld, HPM, ljud)? För att säkerställa tillförlitlig verkan och samtidigt uppnå erforderlig säkerhet fordras fortsatta tekniska bestämningar och karaktärisering av effekterna på människan.

Eftersom varje verkansform är optimal i ett antal specifika situationer och under givna betingelser (avstånd, dos/tidsenhet etc.), erfordras god kunskap om, för varje vapenalternativ specifika, prestanda, säkerhets- och skjutregler. Utbildningen måste även grundas på kunskaper om folkmassors dynamik och mekanismer.

Försvarsmakten har fastställt en definition samt en policy för IDV. Internationella uppdrag har påvisat behovet, att med vapenmakt kunna påtvinga den egna viljan och ändå uppfylla kravet att undvika egna och att reducera motpartens förluster. Felaktig användning av IDV kan, trots begreppet och syftet, förorsaka såväl bestående skador som förluster. Det måste understrykas att *syftet* är att åstadkomma minsta möjliga skada på såväl person som materiel.

Svenska erfarenheter från utlandsmissioner utgör en värdefull utgångspunkt för att inventera, precisera och analysera situationer som inte hittills kunnat hanteras med konventionell vapenmakt.

USA och NATO engagemang vid internationella konflikter av humanitär art har medfört att studier kring IDV ökat. En gemensam internationell policy saknas dock för bruk av de olika tekniker som studeras. Syftet med att använda IDV är att:

- utöka antalet möjliga alternativ,
- *inte* begränsa användning av konventionella vapen,

- *inte* ha krav på sig att vara ofarliga samt
- följa internationella lagar och förordningar



Figur 9.1. Civil olydnad hindrar en UN hjälpkonvoj. (Källa: FOI)

9.4 Upplöpsbekämpning

Svenskt internationellt deltagande har påvisat behovet av nya former av våldsmedel⁷⁸. Samtidigt har omdiskuterade polisinsatser⁷⁹ medfört ett nationellt intresse att utvidga och göra polisens arsenal mer ändamålsenlig.

Att i förväg beskriva en folkmassas intentioner och agerande är mycket svårt. Organisation och värderingar kan resultera såväl i en ordnad demonstration, som ett upplopp. Kulturella och religiösa värderingar styr agerandet men också motreaktionen vid insats av våldsmedel.

Upprørsledarens budskap och sättet att framföra det påverkar mottagarnas attityder och beteenden (agerande). Affekt och aggressionsnivå är andra svåra faktorer att bedöma.

Insikt i de kulturella faktorer, som kan påverka situationen, är en vital aspekt. Kultur kan inte anses vara specifik för ett visst land utan beror på religion, språk, normer och andra gemensamma värderingar i den specifika grupp som agerar. I de flesta fall genomförs internationella aktioner just på grund av att det råder olikheter i kultur, och därmed värderingar, i konfliktområdet⁸⁰.

78. SWEDINT 01-06-11 19 440:51386, "Underlag från erfarenhetsseminarium KS03, 2001-06-06".

79. SOU 2002:122, "Göteborgskommissionen".

80. Lynsey F Gozna, Centre of Human Sciences, QinetiQ, "1st European Symposium on Non-Lethal Weapons", Ertlingen, GE, 2001-09-25--26.

Valet av IDV, som medel, blir därför specifikt för varje situation. Det är väsentligt att kunna förutse folkmassans uppträdande och reaktion. Kunskap om varje medels fysiska effekt är viktig men kanske viktigare insatsens psykologiska. Det är inte tillfredsställande att förmoda eller gissa vilken reaktion som uppnås.

Kunskaper om grupperns dynamik och reaktioner samt medvetande om de kulturella faktorer som är aktuella vid den specifika insatsen är fundamental för möjligheten att lösa konflikter på ett godtagbart sätt.

9.5 Operationella synpunkter

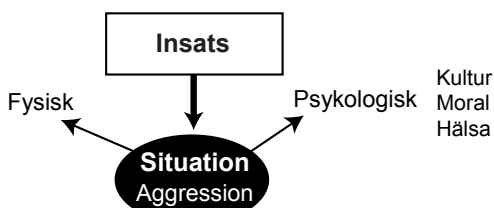
Operativa uppgifter vid internationell insats är av annan karaktär än vid traditionell strid. Uppgifterna kan t.ex. vara:

- Hindra upptrappning av våld
- Skapa förutsättningar för en förhandlingslösning
- Möjliggöra eldupphör
- Säkra basområden och kommunikationer
- Skydda och anvisa säkra områden för hotade personer och grupper
- Skydda och säkerställa humanitära insatser
- Svara för fortsatt övervakning inom konfliktområdet

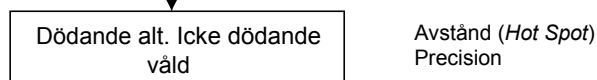
MÅLET

Önskat agerande

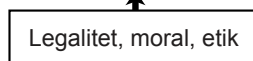
Verkan



Teknik



Acceptans



Figur 9.2. PE, liksom insats av IDV, är resultatet av en process – inte en förmåga! (Källa: FOI)

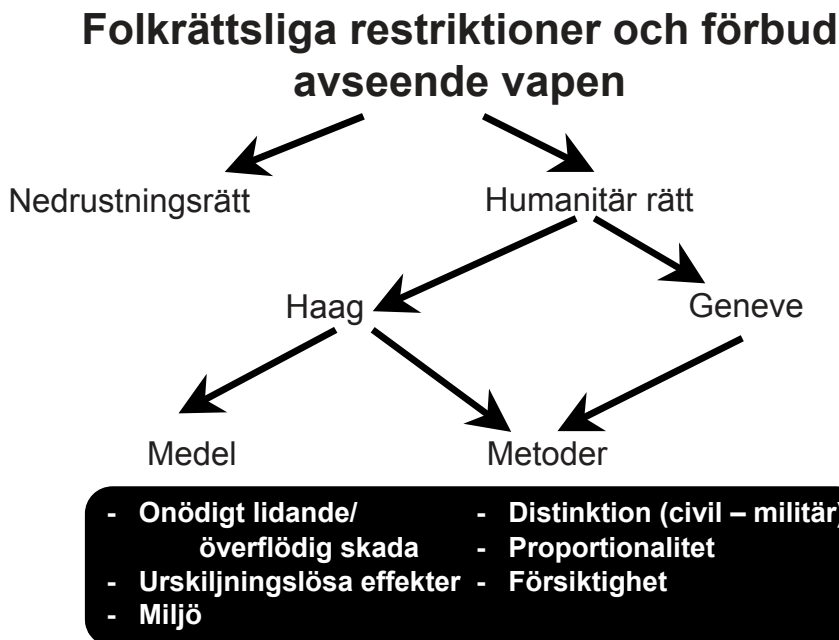
Vid val av IDV är verkan, på ett avgörande sätt beroende av det specifika vapnets verkansavstånd och/eller energiform samt kunskaper och färdigheter

hos truppen. Beslut måste, på grund av de som regel korta verkansavstånden och därmed tidsförhållandena, kunna fattas på låg individ-/förbandsnivå. Antalet variabler är betydligt svårare att definiera än vid konventionellt vapenbruk, vilket understryker behovet av en grundlig utbildning, som en helt avgörande faktor för möjligheten att uppnå eftersträvd effekt.

9.6 Legalitet m.m.

De medel som kan användas/accepteras begränsas av gällande lag, konventioner (se *Figur 9.3*) och moral. "Rules of Engagement" (RoE) samt aktuell målmiljö kan skilja vid olika uppdrag. Störst skillnad innebär naturligtvis valet mellan dödande eller icke dödande våld.

Legaliteten för att använda IDV ställs på sin spets vid användning mot människor. Man kan anse att det ges större utrymme att använda en mildare form av våld tidigare och i preventivt syfte, än vad insats med konventionell vapenmakt tillåter. Så är dock inte fallet! I demokratier är det som regel lagskyddat att få demonstrera och uttrycka sin uppfattning varvid det är legitimt att viss oordning uppstår. Alla IDV-aktioner måste ske inom de ramar som uttrycks i folkrätt och i förbud avseende vapen. Vägledande är därför att IDV- medel inte får var avsedda att orsaka onödigt lidande eller större skada än nödvändigt. De måste ha sådan precis effekt att verkan kan avgränsas till det avsedda målet. Insatsen skall präglas av åtskillnad mellan förövare och åskådare (distinktion) att inte utöva större våld än nödvändigt samt en allmän försiktighet.



Figur 9.3. Översikt internationella avtal. (Källa: FOI)

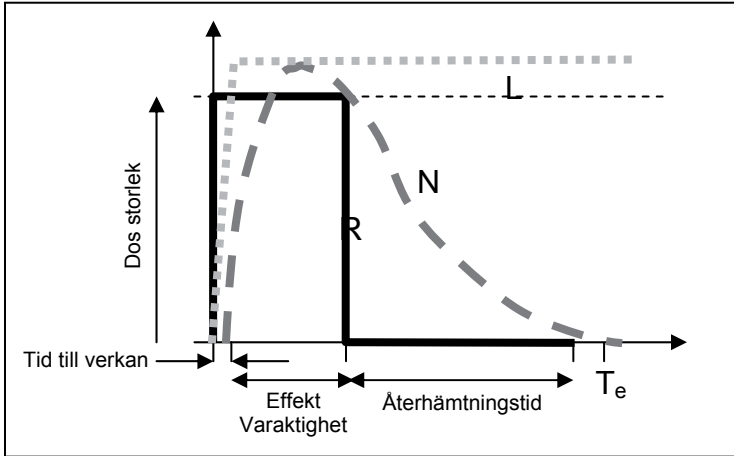
”Onödigt lidande” och ”överflödigt skada” anses föreligga om ett vapen orsakar större lidande än vad som behövs för att försätta en motpart ur stridbart skick respektive sådana skador som inte kan motiveras av militära hänsyn.

9.7 Fysisk och psykisk verkan

Effekten av ett vapen bestäms i fysiska/aritmetiska mått (vikt, räckvidd etc.), *Effektiviteten* är summan av systemprestanda, miljöfaktorer som påverkar verkan i målet, målegenskap, intensjon och målets slutliga agerande/respons, målets reaktion med hänsyn till verkan och till vilken grad målets reaktion motsvarar kraven i den givna situationen.

Utveckling av vapen har traditionellt syftat till maximerad effekt- “mest pang för pengarna”. För IDV är det viktigt att noggrant begränsa verkan till att balansera önskad effekt/respons mot oavsiktliga konsekvenser. Numeriska fakta inom detta område saknas till största delen. Dessa är viktiga för att säkert kunna bestämma både effekt och risker för oavsiktlig skada eller död.

NATO (RTO-grupp HFM-073⁸¹) har genomfört ett arbete för att kunna presentera fakta för att kunna förutsäga risker vid insats av IDV. Eventuella skador vid insats skall vara reversibla, dvs. normalt läka utan bestående men. Kinetiskt våld får t.ex. inte penetrera huden eller orsaka inre sekundära skador.



Figur 9.4. Dos – Responskurvor. (Källa: FOI)

Grafen L i *Figur 9.4* representerar dödande effekt, ofta felaktigt uppfattat som effektiviteten av ballistiska penetrerande vapen. Verkligheten representeras i mer än 50 % av fallen av N. Längre tid före fullständig inkapacitering, samtidigt som återhämtning kan ske utan bestående skador, men efter lång konvalescenstid. Vid utveckling av IDV (R) är strävan att åstadkomma en omedelbar inkapacitering under viss tid samt kort tid för total återhämtning, utan följdverkningar⁸².

9.7.1 Dos- Effekt

Den levererade energin (dosen) i målet kan oftast beskrivas i fysikaliska termer (intensitet/ tidsenhet, energi/yta). Svårare, och inte klarlagt, är hur dessa värden kan överföras i fysiologisk eller psykisk respons hos människan. Eftersom olika individer reagerar olika är det nästan alltid sannolikheten för att något skall inträffa som anges, se *Figur 9.5*. När det gäller lågfrekvent ljud som innefattar frekvenser, vilka skapar resonans i mänskliga organ, anses⁸³ t.ex.

81. Research and Technology Organisation HFM-073/ TG-012 (Human Factors Medicine/ Technical Group).

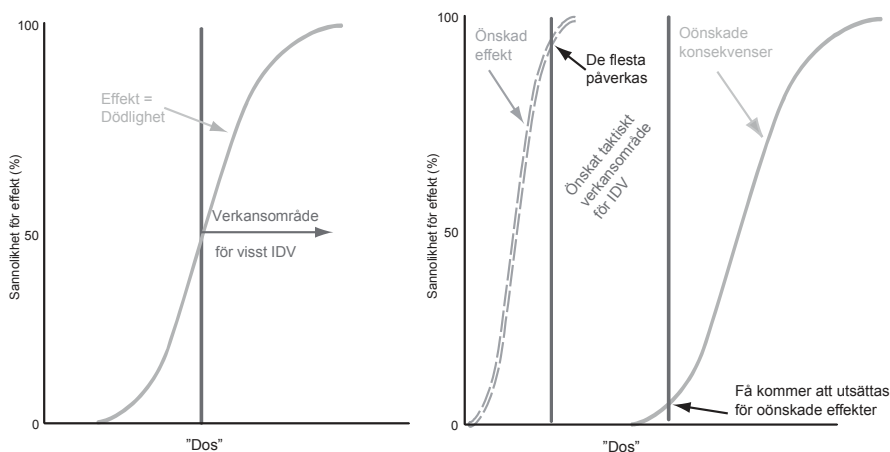
82. Insats med t.ex. "TaserTM" ger omedelbar muskelkontraktion under 5 s. Därefter omedelbar medvetenhet.

83. Dr Hanschke, GE.

| | |
|----------|----------------------------------|
| 4 Hz | orsaka vibration av hela kroppen |
| 12 Hz | orsaka vibration av ryggraden |
| 1-3 Hz | orsaka andningssvårighet |
| 4-10 Hz | orsaka tung andning |
| 4-9 Hz | orsaka allmänt obehag |
| 13-20 Hz | orsaka huvudvärk |

Frekvensområdet varierar med hänsyn till kroppsvikt, storlek och muskeltur. Andra iakttagna effekter är störning av balanssystemet och onormal hjärt-, lung- och mag/ tarmverksamhet.

Ovan nämnda faktorer (kroppskonstitution) påverkar möjligheten att kunna förutse effekten på en individ vid en viss dosinsats. Detta medför att verkan utgörs av en kombination av variabler för doserna för att erhålla önskad/oönskad, effekt/konsekvens. Detta är grunden för att beskriva en verkansform med rimlig säkerhet, se *Figur 9.5*.



Figur 9.5. Dos-Effektvariabler (Dos-respons). Figuren visar principiellt sannolikheten att uppnå viss verkan där det av högra bilden framgår att det ofta är bara inom ett intervall som ett vapen (en dos) är att betrakta som "icke dödande". (Källa: FOI)

9.8 Teknik för reglerbar, icke dödande verkan

Genomförda utvecklingsansträngningar har fokuserats kring tekniska lösningar för att kunna åstadkomma reglerbar verkan. Bredden kan illustreras med den sammanställning av teknikområden, som bedöms möjliga att utnyttja för att åstadkomma reglerbar, icke dödande verkan.

Teknikområdet saknar inte innovationer. Viktigt är dock att kunna placera in tekniken, verkansformen och effekterna, mot bakgrund av fakta om:

- Vilken är den fysiska verkan
- Mot vilket hot kan den användas
- Hur skall den användas
- Begränsningar och regelverk

Följande redovisning utgör exempel på den utvecklingsatsning som pågår internationellt.

9.8.1 *Icke-penetrerande projektiler – "Gummikulor"*

Tekniken är beprövad. Strävan är att öka precisionen och bestämma säkerheten i verkan samt riskerna för bestående skadeutfall.

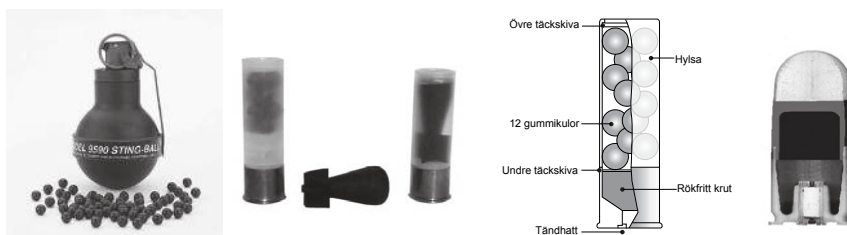
Verkan uppnås primärt genom en så avpassad smärtupplevelse, att målet avbryter sina aggressiva intentioner. Del av målets rörelseförmåga kan slås ut under någon tid. Verkan är beroende av projektilvikt, hastighet och anslagsyta (storlek, form och materialegenskaper).

För att inte orsaka penetration är utgångshastigheten relativt låg (generellt ca 100 m/s). Detta medför att den ballistiska banan är starkt krökt och att projektilen utsätts för en snabb inbromsning. Effektiva verkansavståndet varierar därför avsevärt beroende på vald design.

Projektiler finns av två huvudtyper:

"Stinger"/ "Stingball", som består av många små gummikulor/hagel med relativt låg energi och impuls, se *Figur 9.6*. Dessa förekommer i såväl kalibrarna 12 Gauge⁸⁴ och 40/37 mm som gevärs- och handgranater. Ammunitionen verkar över en yta samt har relativt kort räckvidd. Genom dålig precision finns risk för ögonskador.

84. Gauge=eldrörskaliber "18.5 mm (0.729 inches), can range from a tight 18.3 mm to an extreme overbore of 20.3 mm." (ref. Wikipedia)



Figur 9.6. Exempel på ammunition byggd på "gummikulor"(Illustration: Samuel Svärd. Källa: FOI)

”Distansbatong” (“Baton rounds”/ “Blunt impact”), se *Figur 9.7*, utgörs av en eller ett fåtal större projektiler med större energi och impuls. Ammunitionen är ämnad för punktmål och har en längre räckvidd än föregående.



Figur 9.7. Exempel på grovkalibrig punktmålsammunition. Från vänster: s.k. "baton rounds", hylsa och projektil L21A1 (UK) samt 40 mm skumgummiprojektil M1006 (US) (Källa: FOI)

I syfte att öka säkerheten har såväl den brittiska som amerikanska ammunitionen utvecklats genom samarbete mellan ballistiker och läkare. Ökad säkerhet har uppnåtts genom högre utgångshastighet och lättare projektil än sina föregångare. Detta medför bättre precision under den avsett verksamma delen av banan.



Figur 9.8. 23DS 12. Gauge, "Drag stabilized Bean bag". Projektillen utgörs av hagel inneslutna i en kevlarpåse. Den har en liten anslagsyta och vådaskott kan ge penetration. (Källa: FOI)

De i Israel använda s.k. gummikulorna utgörs av gummiklädda stålcyllindrar, ca 17-18 mm i diameter. Projektilvikt och hastighet är okänd men verkansavståndet uppges till ca 80 m.

Redovisad ammunition förekommer endast till vapen med enkelskotts kapacitet. Vid upplöpsbekämpning finns därför risk att en nödvärnsituation kan uppstå i de fall skottet inte omedelbart ger avsedd effekt. "Fabrique National" har utvecklat ett flerskottsvapen, FN303 med kaliber.68". Ammunitionen kan vara icke-penetrerande, försedd med märkfärg eller OC (se avsnitt 8.1.6).

Ballistik för icke penetrerande ammunition är av stor betydelse för verkan. FOI Vapen och Skydd har genomfört ett antal grundläggande skjutförsök⁸⁵ under åren 2001-2002 i syfte att förstå de fenomen som påverkar tillförlitligheten vid användning av icke penetrerande ammunition.

Försöken utfördes med tre ammunitionsslag.

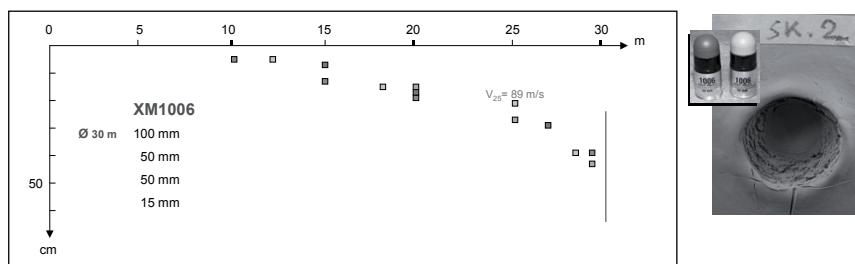
- 40 mm XM 1006⁸⁶ (se *Figur 9.9*)
- "Stinger" (se *Figur 9.6* och *9.10*)
- 12 Gauge 23DS "Bean bag" (se *Figur 9.8*)

Anslag registrerades på 10 m avstånd genom uppmätning av inträngningen i plastelina. Banprofilen och precisionen fotograferades.

Försöket med 40 mm XM1006 visade en god precision på 30 m. Inträngningen var 40 mm på 10 m.

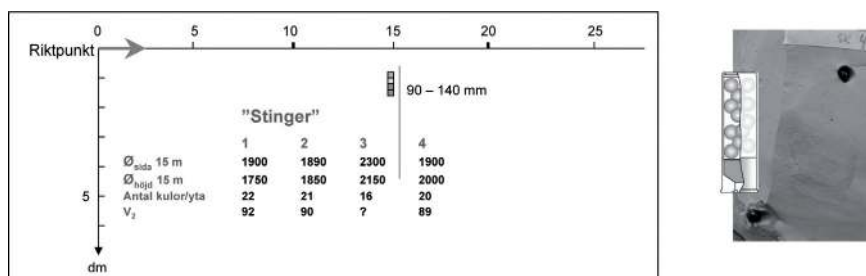
85. Se t.ex. Ewa Lidén, Håkan Örnhed, Melker Skoglund, 2007. *Verkan av IDV-ammunition. Svensk ammunition testad mot surrogatbröstskorg*. FOI-R--2333--SE, Teknisk rapport. ISSN 1650-1942

86. Föregångare till den anskaffade M1006.



Figur 9.9. 40 mm "XM1006", registreringar av bansänkningen och inträngning i plastelina. (Källa: FOI)

40 mm "STINGER" visade god precision i uppmätt medelträffpunkt på 15 m. Den stora spridningen, ca 2m diameter, medförde att det var svårt att få träff i målblocket. Ammunitionen torde inte uppfylla distinktionskravet. Inträngningen på 10 m var 19 mm.



Figur 9.10. 40 mm "Stinger", registreringar. (Illustration: Samuel Svärd. Källa: FOI)

9.8.2 Nätteknologier

Tekniken utnyttjas både för att stoppa personer och fordon. Vid utskjutning ur ett räfflat eldrör, utvecklas nätet genom centrifugalkraften. Nätet kan i vissa applikationer vara klibbigt, för att försvåra frigöring.

General Dynamics Ordnance and Tactical Systems har utvecklat ett fordonstransporterat system PVAB. PVAB har kapacitet att stoppa ett fordon (3 400 kg) som kör med 72 km/t. I Storbritannien har QinetiQ patent på ett motsvarande personburet system ("X-NETTM Vehicle Arresting System"), vilket kan stanna lättare lastbilar.

9.8.3 Elektriska (elektriska stötar)

Via utskjutna pilar kan elektriska pulser överföras till målet. Trådar överför elektriska signaler, pulsspänning 50kV och 0,004 A, med en pulsbredd av några få mikrosekunder, cirka 1J/puls⁸⁷, och repetitions hastighet 10-15 Hz. Detta or-

87. Jfr "pacemaker" ca 150-400J/puls.

sakar en okontrollerbar sammandragning av kroppens muskler. Begränsning är den korta räckvidden, varför den främst används för polisiärt närförsvär. Maximalt effektivt avstånd är mindre än 7 m.

För att medge insats på längre avstånd finns utvecklingskoncept med en "elektrisk" projektil. Denna avses fästa vid målet med hullingar eller klister samt innehålla batterier och elektronik för att överföra en kort pulsskur vid anslag.

9.8.4 *Kemiska (tårgas, klister, "superhala" ämnen, korrosionsaccelererande etc.)*

Kemiska substanser för infångning samt som nedsätter friktion utvecklas. Uppmärksammade är också bilder i pressen på infångande klister. Denna senare teknik anses idag vara ett alternativ för att vid strid i bebyggelse kunna försluta kontrollerade utrymmen.

Friktionshämmande medel, "slippery foam", studeras som ett alternativ för att kunna stoppa fordon genom att reducera förarens möjlighet att framföra fordonet kontrollerat och därmed köra av vägen och kunna omhändertas.

Andra futuristiska tekniker är så kallade superkorrosiva ämnen samt ämnen som påverkar materials struktur och bärande förmåga.

Vid polisiära insatser för upploppsbekämpning används kemiska medel mot person, såsom pepparsprej och tårgas (CS, CN och OC)⁸⁸. Medlen är förbjudna som stridmedel enligt kemvapenkonventionen. För förband i internationell tjänst med uppgifter, som är av polisiär karaktär, bör andra regler vara möjliga. Spridning av agens kan ske som vätskestråle, dimma eller skum. Den pepparsprej som används av svenska polisen och som närskyddsmedel för utlandsstyrkan, ger en stråle med ca 5 m räckvidd.

9.8.5 *Farmakologiska och biologiska*⁸⁹ *(lugnande, irriterande, illaluktande etc.)*

Denna typ av ämnen är mer spekulativa än övriga redovisade tekniker. Det är också mot dessa som en stor del av kritiken mot IDV fokuseras – möjligheten att manipulera en individs vilja och attityd med kemiska medel.

Dramat på Dubrowka teatern i Moskva den 23 oktober 2002 innebar att ca 800 åskådare togs som gisslan av ca 50, med sprängladdningar beväpnade, rebeller. Vid fritagningen användes gas för att snabbt slå ut gisslantagarna och förhindra att de skulle hinna utlösa laddningarna. Terroristerna kunde skjutas eller avväpnas utan att ha kunna sätta sina planer i verket.

88. Se även avsnitt 8.1.5 och 8.1.6.

89. Ibid.

Det är sannolikt att den gas som användes var Fentanyl. Ett narkosmedel som är hundra gånger starkare än morfin. Vid överdos används som motmedel Nelaxon

Beträffande den medicinska beredskapen, hade inte tillräckliga åtgärder vidtagits för att säkerställa återhämtning av de ur gisslan som påverkats. Sjukvården var lång tid ovetande om vilken agens som använts. Information om detta kunde ha minskat antalet döda.

9.8.6 Optiska (laser⁹⁰, blixtar och, visuell stimuli)

Forskning kring andra överföringsformer av energi, än kinetiska, är en viktig del av det i USA vid försvarsdepartementet organiserade, Joint Non Lethal Weapons Directorate (JNLWD) forskningssatsningar. Målet är att kunna splittra ett upplopp på avstånd mellan 50 och 1 000 m, dvs. bortom den räckvidd som uppnås med kinetisk energi.

Ett flertal utvecklingsprojekt pågår i USA bl.a. av ”Advanced Tactical Laser” (ATL), vilken skall kunna leverera en variabel energimängd t.ex. genom variation av pulsens varaktighet, våglängd eller intensitet.

| Verkan av några lasereffekter | |
|-------------------------------|---|
| 0,005 W | Laserpekare, typiskt oskadlig, 20,000 gånger ljusare än en 100W lampa på 10 m |
| 0,01 W | Blinkreflexen skyddar öga |
| 0,03 W | Bränner genom ett pappersark |
| 0,5 W | Ögonskada innan blinkreflex |
| 1-5 W | Hudrodnad/ brännskada/ örkolning |
| 10 W | Gör hål i ett slaggbetongblock |
| 1 000-3 000 W | Industriell svetsning och skärning |
| 25 000 W | ”Vapen-klass” |

Genom att utnyttja detta spann av verkansmöjligheter kan tekniken utnyttjas för att, genom alstrad värme, både förhindra personer och genom hög effekt stoppa/förstöra materiel.

Starkt irriterande ljussken, stroboskopljus etc. är en annan optisk verkan som provas. TNO⁹¹ ha genomfört försök och mot bakgrund av resultaten

90. Jmf avsnitt 6.2 och Lärobok i Militärteknik vol. 2: Sensorteknik, kapitel 6 (LIM 2).

91. Pascal Paulissen, TNO, NL.

analyserat effekten på personer av så kallade "Flash-Bang" verkan. Den eftersträvade responsen är att genom överraskning få målet att stanna, fly eller bli desorienterad.

Blixten ("Flash") har en varaktighet på 0,1 s. Den kan *ibland* ge avsedd verkan. Det finns inget realistiskt skydd samtidigt som man inte kan träna sig att inte reagera.

Tabell 9.1. Effekt av ljusblix

| | | Dager | Mörker |
|----------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Skada | cd/m ² | 2,5 x 10 ⁸ | 8,5 x 10 ⁷ |
| Inkapacitering | cd/m ² | 4,7 x 10 ⁷ | 3,1 x 10 ⁴ |

Dosen för att åstadkomma inkapacitering genom knallen ("Bang") ligger mycket nära skadeträskeln. Detta ökar risken för oavsiktlig skada. Skydd mot insats kan åstadkommas genom hörselskydd. Verkan är mycket osäker.

9.8.7 Mikrovåg (HPM, EMP)⁹²

Ett "brännande" system för att påverka personer på stora avstånd. Verkan utgörs av alstrad värme som har en brännande, smärtsam intensitet. ADS⁹³ arbetar med 0,3 mm våglängd och frekvensen ca 94 GHz. Effekttätheten är 0,5 W/cm² x 1,2 s = 6 J/cm². Gränsvärdet för smärta förorsakad av värme anses vara ca 4 J/cm² och för en minimal brännskada ca 8 J/cm². Verkan är demonstrerad. Verkansavståndet bedöms⁹⁴ vara omkring 1-1,5 km

9.8.8 Akustiska (infraljud, hörbart, ultraljud)

Ljud ansågs tidigt kunna verka genom intensitet, outhärdligt eller smärta, eller frekvens, resonans med kroppsfunctioner, illamående och obehag. Ett svenskt projekt inleddes med en nu avbruten granskning av Vortex-fenomenet⁹⁵. Fenomenet, som uppmärksammades redan på 1950-talet vid FOA, demonstrerades vid FOA (1997-1998). Utvecklingen fullföljs internationellt inom ett stort antal projekt.

92. Se även avsnitt 6.1.

93. "Active Denial System" (ADS).

94. Bedömning från TV-inspelningar av försöksupställningen.

95. Lillberg Eric, Fureby Christer A. *Computational Study of Vortex Ring Generation*, FOA-R--01290-310. Stockholm: FOA, 1999.

Tyskland utvecklar en gasexplosionsdriven "Infrapulse-Generator". (IPG). Tekniken har demonstrerats och synes ha en bra funktionell tillförlitlighet. Den maximala impulsfrekvensen är 12 Hz, vilken genereras i fyra rör. Kunskap och förståelse av de fysiologiska effekterna är inte belagd.

För att varna fordon som närmar sig en postering har USA utvecklat ett ljudsystem "Long Range Acoustic Device". Utrustningen används såväl för att överföra meddelanden, som att avge en obehaglig hög varningston.

| | |
|----------|---|
| Effekt | 151 dB på 1 meter, ca 105 dB på 500 meter |
| Lobbredd | 12°-20° |
| Lobform | Symmetrisk kon |

10. Eldrörsteknik

Avgörande för ett eldrörs systems verkan är, utöver stridsdelens verkan vid träff, den precision med vilken stridsdelen kan levereras och räckvidd som kan nås. Dessa båda är dock i allmänhet starkt kopplade till varandra så att precisionen avtar med ökande skottvidd.

Ofta eftersträvas höga mynningshastigheter på eldrörsvapen och man kan fråga sig varför. Skälen är olika i olika tillämpningar, några exempel på varför höga och ökande mynningshastigheter kan vara önskvärda ges nedan.

- Vid direktriaktad eld minskar skjuttiden och banan blir flackare vilket minskar kraven på noggrannheten i avståndsbedömning och framförhållning och vid i övrigt lika villkor ökar träffsannolikheten⁹⁶. (Vad gäller eldhandvapen finns dock internationella regler som begränsar tillåten mynningshastighet för att vapnen inte skall klassas som ”inhumana”)
- Som framgått av bl.a. avsnitt 3 och 5, *Figur 5.9* ökar verkan med ökande (anslags)hastighet.
- För artillerisystem ökar maximal möjlig skottvidd, vilket kraftigt ökar den area inom vilket systemet kan verka och ökar friheten vad gäller val av grupperingsplats.

En viktig faktor för splitterstridsdelars verkan är banans utseende samt brisadpunktens läge. För att i dessa fall få optimal verkan förses numera granaterna oftast med zonströr som förlägger brisadpunkten till ”bästa” läge. I vissa sammanhang kan en fördröjning av stridsdelens detonation efter inträngning genom ett skydd vara det optimala varvid tändröret bör ha en viss tidsfördröjning.

96. Berglund Erik. Luftvärnskanoner mot manövrerade mål. Stockholm, FOA 1990, FOA C 20816-2.5, 8.4.

10.1 Ammunition

Till varje eldrörsvapen finns en eller flera typer av ammunition. Ammunitionen kännetecknas av att dess huvuddelar är drivladdningen och stridsdelen med tändrör. Drivladdningen accelererar stridsdelen (eller motsvarande) i eldröret. Till ett och samma vapen finns ofta fler typer av ammunition, utöver olika stridsammunition, också övningsammunition och ammunition med andra funktioner, som lys och rök. I vissa fall skiljer sig ammunitionsslagen åt genom olika stora drivladdningar, vilket då ger olika utgångshastighet. Vissa ammunitionstyper kan skjutas ur olika vapen, men det är långt ifrån självklart att en ammunition med viss kaliber kan skjutas ur ett annat vapen med samma kaliber. Ammunition avsedd för eldrörsvapen kallas ”kaliberbunden ammunition”. Som övrig ammunition räknas sprängmedel, missiler, handgranater mm.

Kaliberbunden ammunitionen kan finnas som ”enhetspatron” se t.ex. eller som ”delad ammunition”. I det förra fallet hanteras och laddas stridsdel med hylsa och drivladdning som ett kolli, vilket används i fin- och mellankalibriga vapen samt vissa grovkalibriga, medan i det senare fallet hanteras och laddas stridsdelen för sig och drivladdning i eller utan hylsa för sig, vilket främst används för artilleri. Granatkastare kan, i detta sammanhang, sägas utgöra ett specialfall.

Ammunitionshylsorna är oftast av metall men även brännbara hylsor kan användas för att minska vikten och öka eldhastigheten. Kombinationer förekommer också, så t.ex. är hylsbotten med tändanordning av metall (mässing) och resten av hylsan av brännbart material i ammunitionen till strv. 122 (Leopard).

10.2 Tändrör

Tändröret utlöser sprängladdningen i stridsdelen (eller där så är aktuellt den funktion som önskas t.ex. lys eller rök). Tändrören indelas efter

- tändsätt
 - anslagsrör
 - tidrör
 - tidanslagsrör
 - zonrör (utlöser på visst avstånd från målet)
 - zonanslagsrör
 - olika kombinationer av ovannämnda, t.ex. Bofors 3P

- placering
 - spetsrör (det absolut vanligaste)
 - centralrör
 - bottenrör (används i granater där stor hållfasthet krävs och tändröret skall "överleva" t.ex. penetration av kraftigt skydd)
- känslighet, är bara aktuellt för anslagsrör och då för att uppskatta det svagaste målet som den tändrörsförsedda granaten briserar för. Känsligheten anges som
 - normal
 - känslig
 - högkänslig
- snabbhet⁹⁷, är även det aktuellt endast för anslagsrör och anger tiden från anslag till brisad. Snabbheten anges som
 - ögonblicklig
 - normal
 - kort fördröjd
 - lång fördröjd

Ett tändrörs beteckning anger vilken typ av rör det är fråga om t.ex. öhksar = ögonblickligt högkänsligt spetsanslagsrör. Val av tändrör och tändrörsinställning görs, där så är möjligt, för att uppnå optimal verkan i varje enskilt fall.

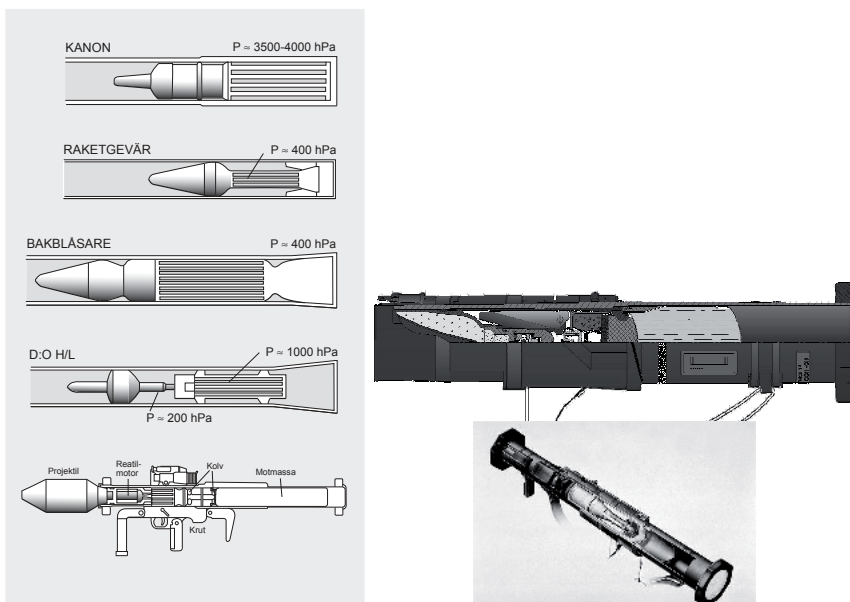
10.3 Om olika typer av eldrörssystem

Man kan skilja mellan två huvudtyper av eldrörsvapen nämligen de rekylfria och de rekylfria. De rekylfria vapnen kännetecknas av att eldröret är slutet bakåt, vilket under utskjutningsförloppet ger upphov till en bakåtriktad kraft, rekylkraften. Hur denna rekylkraft "tas om hand" på större pjäser beskrivs nedan.

Den enklaste formen av rekylfria vapen är ett utskjutningsrör för olika typer av raketer där en raketmotor driver projektilen till den önskade hastigheten. Raketmotorn kan brinna slut i eldröret, fortsätta att brinna utanför detsamma eller vara så utformad att en del brinner slut i eldröret och en del alternativt en annan motor tänds en bit utanför eldröret. Många moderna, rekylfria vapen har

97. Se mer om tändrör t.ex. i "Sjöartilleriets grunder" 1997, Sjöart grunder M7744-738101, ISBN 91-972385-2-X och Amlära A, M7730-850020.

laddningar motsvarande de rekylrande vapnens, men genom att eldröret är öppet bakåt och oftast utformat på ett speciellt sätt, med en dysa, uppstår en kraft framåt, som i princip eliminerar rekylkraften. Detta kräver dock, för att uppnå en viss utgångshastighet vid given projektilvikt, en mycket större drivladdning än i ett rekylrande vapen, men i gengäld blir själva vapnet lättare.



Figur 10.1. Olika utskjutningsmetoder. Rekylrande, raket, rekylfri, hög-lågtrycksutskjutning samt motmassevapen med kolvar. Till höger motmassevapen för skjutning ur slutna utrymmen. (Källa: FOI resp. SAAB Bofors Dynamics AB)

Den vanliga ”bakbläsaren” har nackdelen att det krävs en stor krutladdning för att uppnå erforderlig utgångshastighet. Denna ger upphov till stora riskområden bakåt samt höga tryck på skytt och laddare. Det största problemet är dock att det bildas fragment av den deformerade bottenbrickan. Dessa kastas bakåt med hög hastighet. Ett sätt att motverka denna nackdel är att öka massan som kastas ut bakåt, men låta den ha en lägre hastighet. Därmed ökar den totala rörelsemängden bakåt och en större del av krutladdningen kan verka framåt. För att inte öka riskområdet bakåt måste den tillförda massan - motmassan - upplösas omedelbart. Som motmassa kan användas vatten, finkornig sand, filspån eller, nu vanligare, plastfoliebuntar (se även avsnitt 10.3.4).

Motmassan måste väga i nästan lika mycket som projektilen (50 à 75 %, resten av massan består av de utströmmande krutgaserna), vilket således ökar det laddade vapnets totala vikt. Å andra sidan kan laddningen göras något mindre vilket ger ett något tystare vapen.

Olika typer av kombinationer av de beskrivna teknikerna för rekylfria vapen finns och teknikerna används också för start av missiler av olika slag.

Eldrörsvapen bärs eller kan bäras av alla typer av plattformar allt från fotsoldaten till de största och tyngsta mark-, luft- och sjöfarkosterna.

Riktning av eldrörsvapen sker med endera av två principer antingen *direkt riktat* eller *indirekt riktat*. Direkt riktning innebär, i princip, att man har siktlinje från vapnet till målet och riktar med denna siktlinje. Indirekt riktning innebär att man utifrån kännedom om pjäsens och målets lägen beräknar hur eldröret skall riktas.

Ett *rekylrande eldrörsvapen* består av minst några av följande delar:

- Eldrör med mekanism och ev. mynningsbroms
- Vagga med balanseringsinrättning
- Över- och underlavett
- Rekylbroms och framföringsinrättning
- Riktmedel

Ett eldrör är oftast räfflat, undantag är moderna stridsvagnskanoner, för att ge projektilen en viss rotation, som krävs för dess stabilitet i banan

Eldrörets längd anges oftast som ”kaliberlängd”. Kaliberlängden anger hur lång den räfflade delen av eldröret (eller i slätborrade eldrör motsvarande längd) är uttryckt i antal kalibrer. Om alltså ett eldrör med kalibern 155 mm har längden 39 (kaliber) innebär det att den räfflade delen av eldröret är (ca) $155 \times 39 = 6045$ mm långt.

När drivladdningen (se avsnitt 2.4) i en normalt eldrör förbränns omvandlas ca 30 % av krutets energiinnehåll till rörelse hos projektilen. Huvuddelen av energiinnehållet övergår i stället till värme hos krutgaser och eldrör. Stor uppvärmning av eldröret ökar slitaget och minskar pjäsens precision och livslängd. Problemet är störst vid pjäser med hög utgångshastighet, t.ex. stridsvagns- och luftvärnskanoner. 40 och 57 mm automatkanoner måste som regel genomföra flera eldrörsbyten under pjäsens livslängd eller ha en anordning för kylning av eldröret.

I eldrörets bakre del finns bakstycket med mekanism. På finkalibervapen innehåller mekanismen slutstycket. På främst grovkalibriga pjäser finns två olika typer av mekanism. Kilmekanism används främst på kanoner där laddningen är automatiserad och hög eldhastighet eftersträvas. En kilmekanism medger hög eldhastighet men är relativt tung och kräver att drivladdningen är innesluten i en hylsa för att ge tillräcklig tätning. Skruvmekanism används främst på tyngre haubitser och kanoner som skjuter hylslös ammunition och ej har allt för höga

krav på eldhastighet. Skruvmekanismen är lättare än kilen och uppnår tillräcklig tätning även utan laddningshylsa. Bofors haubits FH 77 finns både med kilmekanism (FH 77A) och med skruvmekanism (FH 77B).

I sammanhanget kan dock noteras att än i dag förekommer mynningsladdare, nämligen många typer av granatkastare. Granatkastare är pjäser som tidigare alltid använder övergradsbanor, se avsnitt 10.3, och med få undantag är slätborrade och mynningsladdade. Liksom haubitser använder granatkastare olika stor drivladdning beroende av skjutavstånd och önskad banprofil. Drivladdningarna är som regel fästade runt granatens stjärtparti. Före laddning avlägsnar laddaren eventuella överflödiga laddningar. Tack vare sin höga bana är granatkastare särskilt lämpade för att bekämpa mål i bebyggelse eller på toppen av höjder. Enklare granatkastare har en fast tändspets i botten på eldröret. Granaten släpps ned genom mynningen och drivladdningen tänds när tändpatronen i granatens bakparti träffar tändspetsen. På tyngre granatkastare finns som regel en rörlig tändspets som manövreras genom att dra i ett handtag eller rycka i en lina.

För att ta upp delar av rekyllkrafterna och medge en lättare pjäskonstruktion är eldröret ofta försett med någon form av mynningsbroms. Det finns två huvudtyper av mynningsbromsar, dels den cylindriska med hål (FH 77A) eller gälar, dels den s.k. tallriksbromsen med en eller flera (delar av) ”tallrikar” (FH 77B). Mynningsbroms förekommer även på finkalibervapen t.ex. Ag 90.

Mynningsbromsarna fungerar så att krutgaserna när de passerar genom mynningsbromsen får en bakåtriktad hastighet. Genom denna bakåtriktade gasström bromsas eldrörets rörelse bakåt, rekyllängden minskas och rekyllkrafternas verkan begränsas. På pjäser där vikten är av liten betydelse behövs ingen mynningsbroms. Stridsvagnar har som regel ingen mynningsbroms då en sådan vid skjutning i låga elevationer lätt drar upp ett dammoln, som röjer vagnens position och sänker den praktiska eldhastigheten genom att sikten skymms.

För att ytterligare minska verkan av rekylen är pjäser med större kaliber försedda med en rekylhäminrättning.

Pjäser som skjuter från slutna utrymmen, t.ex. stridsvagn, är ofta utrustade med en s.k. krutgasejektor för att hindra att kvarliggande krutgaser strömmar in i besättningsutrymmena och förgiftar besättningen.

Riktmedel för indirekt eld kallas riktinstrument. De medger i allmänhet både direkt och indirekt riktning. Riktinstrument av optisk/mekanisk eller optoelektrisk typ förekommer.

10.4 Innerballistik, förloppet i eldröret

Som nämnts inledningsvis är ammunitionens huvuddelar drivladdningen och stridsdelen. Drivladdningen består av krut, till absolut övervägande del s.k. nitrocellulosakrut, NC-krut, (se avsnitt 2.4) något som också kallas kemiskt krut

eller homogent krut. I artilleripjäser används oftast karduser, ”tygpåsar”, med krut. Dessa kan ligga direkt i eldröret bakom projektilen eller i hylsor. Skälet till att detta system används är att man genom att variera och kombinera dessa karduser på ett speciellt sätt kan variera mynningshastigheten inom stora områden något som är önskvärt för att erhålla viss skottvidd och form på banan.

Projektilen får sin rörelse av det gastryck som bildas i eldröret. Förenklat kan man säga att innerballistiken slutar vid mynningen. Därefter tar vad som kallas övergångsballistik vid, något som inte behandlas här, och sedan talar man om ytterballistik. De innerballistiska krafterna bestämmer projektilens mynningshastighet och rotationshastighet. (Huvudsakligen är det rotationen kring projektilens längdaxel, men rotation runt tväraxlarna uppstår även, vilket ger upphov till visst spridningsbidrag.)

Drivladdningens krut antänds via antändningsmedlet som i allmänhet ligger bakom laddningen, men som också kan ligga i ett centralt rör i laddningen. Detta antändningsmedel antänds antingen genom slag eller genom en gnista/elektrisk ström/laser.

Då krutet börjar brinna bildas stora mängder het gas. Eftersom krutets brinnhastighet är beroende av trycket ökar gasproduktionen vanligtvis snabbt med ökande tryck. I ett tidigt skede börjar projektilen röra sig, dock inte omedelbart eftersom vissa motstånd först måste övervinnas. Inledningsvis rör sig projektilen inte fortare än att gasproduktionen gör att trycket i eldröret bakom projektilen ökar. I något läge börjar dock projektilen röra sig så snabbt att den gas som produceras inte kan hålla trycket uppe utan trycket börjar sjunka. Det maximala trycket som uppnås i eldröret måste vara under god kontroll eftersom eldrörets konstruktion endast medger ett visst maximalt tryck. Krutets brinnförlopp bestäms utöver kemisk sammansättning av ”krutkornens” geometriska utformning. Denna geometriska utformning kan variera mycket, allt från små runda korn till platta band eller långa stavar, solida eller med många längsgående hål.

10.5 Ytterballistik, förloppet i luften

Stridsdelen från ett eldrörsvapen beskriver alltid en bana genom luften. Denna banas utseende, och möjligheten att prediktera den, är avgörande för den slutliga verkan som uppnås.

Fin- och mellankalibervapen samt kanoner skjuter vanligtvis direktriktad flackbane eld medan granatkastare och haubitser vanligtvis skjuter indirekt riktad kastbane eld. Projektilbanor med *nedslagsvinklar* >20-25 grader kallas *kastbana* medan projektilbanor med *nedslagsvinklar* <20-25 grader benämns *flackbana*.

Vid skjutning med övergrader är *utgångsvinkeln* (elevationen) större än den elevation som ger maximalt skjutavstånd och vid skjutning med undergrader är den mindre än den elevation som ger maximalt skjutavstånd. Gränsen mellan över och undergrader är alltså den vinkel som ger maximal skottvidd. Normalt ligger denna i intervallet 43-52 grader.

Med uttrycket bestruket stycke för en viss målhöjd menas det vågräta avståndet från nedslagspunkten på marken till den punkt på projektilbanan, där den nedåtgående grenen på projektilbanan har en höjd över marken, som är lika med målhöjden. Ju flackare en bana är, desto större blir det bestrukna stycket. Om det bestrukna stycket är stort, medför felaktigt val av sikte (t.ex. fel i avståndsbedömning) endast obetydliga förändringar i träffpunkt i höjddled.

Att studera en *bana i lufttomt* rum kan förefalla ointressant och irrelevant men ger ändå en uppfattning om vilka storheter som är av stort intresse och hur de påverkar banan. Under förutsättning att inga speciella åtgärder vidtagits på projektilerna som drivning i banan eller att de försetts med vingar och/eller styrning representerar tomrumsbanan vad som absolut maximalt kan uppnås avseende skottvidd.

För tomrumsbanan gäller (under antagande att jordytan är plan) att skottvidden (D), skjuttiden (t_s) och maximal möjlig höjd (h_{max}) är:

$$D = (V_0^2/g) \sin 2\theta_0$$

vilket ger maximalt möjlig skottvidd vid $\theta_0 = 45^\circ$ till $= V_0^2/g$

$$t_s = (2V_0/g)\sin\theta_0$$

$$h_{max} = V_0^2/2g$$

där V_0 är mynningshastigheten, g är jordaccelerationen $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ och θ_0 är utgångsvinkeln \approx pjäsens elevation.

Av detta framgår bl.a. att, för detta idealiserade fall, maximalt skottvidd uppnås vid 45° elevation och att skottvidden växer som mynningshastigheten i kvadrat dvs. att om mynningshastigheten dubblas så fyrdubblas skottvidden. Vidare ser man att banan endast påverkas av utgångshastighet och vinkel alltså storheter som massan spelar här ingen roll!

I tomrumsbanan får projektilen alltid samma vinkel och hastighet vid nedslaget som den hade vid mynningen.

Det område utanför vilket en utskjuten projektil inte kan nå i lufttomt rum (förutsatt att den inte är försedd med drivning) kallas säkerhetsparabeln och kan beräknas som

$$y = \frac{V_0^2}{2g} - \frac{gx^2}{2V_0^2}$$

där:

x = horisontellt avståndet från mynningen

$y = h$ = höjden

Hur noga en bana och nedslagspunkten kan predikteras är mycket starkt beroende av hur väl man känner den atmosfär genom vilken projektilen färdas. Främst är det luftens densitet och vindens storlek och riktning som spelar avgörande roll. Luftens densitet beror av trycket och temperaturen som varierar med höjden. Olika modeller för hur *atmosfären* ”ser ut” finns och används i elledningssystem där också aktuella mätningar ofta kan läsas in. Vad gäller vinden är det främst mätningar och prognoser som kan användas. Ju mer långskjutande system man har ju större inflytande får atmosfären. Atmosfären berörs inte mer ingående i denna bok (se mer i Lärobok i Militärteknik, Vol. 1: Grunder, LIM 1)⁹⁸

Banor i atmosfären får kortare skjutavstånd än tomrumsbanan genom att luftmotståndet bromsar projektilen. För långa skjutavstånd kan den verkliga banan bli väsentligt kortare än tomrumsbanan medan för flacka banor med kort skjuttid är skillnaden mindre. I det verkliga fallet blir också sluthastigheten mindre än utgångshastigheten och nedslagsvinkeln brantare än utgångsvinkeln.

Storleken på den kraft som bromsar projektilen i luften beror huvudsakligen på projektilens form, storlek och hastighet. Den bromsande kraften brukar betecknas med D (från engelska ”drag”) och beräknas som

$$D = qSC_D = \frac{\rho V^2}{2} SC_D$$

där

C_D är den s.k. motståndskoefficienten, som främst beror av projektilens form, och kan sägas vara ett ”godhetstal” för projektilen *men* C_D varierar också med flyghastigheten.

q ($=\rho V^2/2$) är det s.k. dynamiska trycket där ρ är luftens densitet ($\approx 1,25$ kg/m³ vid marknivå) och V är flyghastigheten (eg. den relativa hastigheten mellan det flygande föremålet och omgivande luft). Densiteten varierar med luftens tryck, p , och absoluta temperatur, T , (de storheter som vanligtvis mäts) i stort

98. LIM 1, 2007, *Lärobok i Militärteknik*. Volym 1 Grunder. FHS. Stockholm.

enligt allmänna gaslagen; $\rho = p/RT$, där R är den s.k. individuella gaskonstanten som har värdet ≈ 287 för luft⁹⁹.

S är en s.k. referensyta som beskriver kroppens storlek. Oftast används i dessa sammanhang maximala tvärsnittsarean (sedd framifrån) alltså $S = \pi d^2/4$, där d är (en s.k. referenslängd =) diametern = kalibern

Storleken, i första hand den största diametern, på projektilen påverkar alltså bromskraften så att om diametern dubblas så fyrdubblas bromskraften. Vid låga hastigheter (där oftast C_D är konstant), ökar motståndskraften kvadratisk med hastigheten, dvs. även här är det så att om hastigheten fördubblas så fyrdubblas motståndet. Vid högre hastigheter blir förloppet mer komplicerat, speciellt gäller detta runt $M=1$ (=ljudhastigheten i omgivande luft).

Vid underljudhastigheter brukar *motståndskoefficienten*, C_D , betraktas som konstant för att då hastigheten närmar sig ljudhastigheten öka mycket kraftigt till ett maxvärde, som ofta infaller strax efter ljudhastighet, för att sedan vid överljudhastighet, i allmänhet, sakta avta (approximativt proportionellt mot $1/\sqrt{(M^2-1)}$).

Då flyghastigheten närmar sig ljudhastigheten ökar *motståndet* (= *motståndskraften*, D) mycket kraftigt för att vid överljudhastighet oftast inte öka lika snabbt med ökande hastighet. Banans utseende kommer också kraftigt att påverkas av projektilens massa. Ju större massa projektilen har ju mindre blir retardationen under i övrigt konstanta förhållanden.

För att jämföra olika projektilers ”godhetstal” används ibland begreppet *ballistisk faktor*, vilken definieras som m/SC_D . En projektil med en ett högt värde har mindre retardation (hastighetsavtagning) än en med ett lågt värde.

För artillerisystem (lv- och fält-) beräknas banorna i s.k. skjutelementräknare eller centralinstrument där främst elevationen för viss önskad skottvidd (och i lv-fallet höjd) beräknas vid viss given mynningshastighet men också korrigeringar i riktning och elevation som krävs p.g.a. t.ex. vind och andra faktorer som påverkar banan. Vid bekämpning av rörliga mål måste inriktning ske mot en framförpunkt vars läge beräknas också med utgångspunkt från en prediktering av målets bana¹⁰⁰. På motsvarande sätt måste hänsyn tas då den skjutande plattformen rör sig. Liknande data kan fås ur skjuttabeller, vilka tidigare användes för samma ändamål som skjutelementräknarna gör idag.

En projektil till ett eldrörsvapen *stabiliseras* på ett av två möjliga sätt antingen genom s.k. rotationsstabilisering eller genom aerodynamisk stabilisering (fenstabilisering). I det förstnämnda fallet uppnås stabilitet i banan genom att projektilen ges en rotation kring sin längdaxel, vilket åstadkoms genom

99. Den individuella gaskonstanten för en gas beräknas som (den universella gaskonstanten/molekylvikten) där den universella gaskonstanten ≈ 8314 [J/kmol K].

100. Se t.ex. Skjutlära för luftvärnet, Skjutlära Lv, M7742-146001 eller Sjöartilleriets grunder, Sjöart grund M7744-738101, ISBN 91-972385-X.

räfflorna i eldröret. Utan denna rotation skulle projektilen ”välta” i banan. En rotationsstabiliserad projektil kan dock inte göras hur lång och slank som helst utan praktiska värden begränsar vanligtvis längden till 5-7 gånger kalibern. Önskar man längre projektiler måste dessa göras aerodynamiskt stabiliserade (=fenstabiliserade) dvs. de förses baktill med fenor, som kan vara fasta eller utfällbara.

10.6 Faktorer som påverkar ett eldrörssystemets verkan¹⁰¹.

Helt avgörande för verkan av ett eldrörssystem är, utöver det enskilda skottets verkan, den precision med vilken man träffa ett mål eller målområde. Att projektilerna inte träffar målet beror på tre à fyra huvudorsaker nämligen sådana faktorer som har med utskjutningen att göra (innerballistiken), sådana faktorer som påverkar projektilen i banan (ytterballistiken) och faktorer som har att göra med osäkerhet i bestämning målets position (vid beräknad träfftidpunkt) och av den egna positionen (det senare gäller främst artilleri och granatkastare) samt fel vid beräkningen av banan (i de enklaste fallen fel i bedömt avstånd).

Vid skjutning i serier eller salvor skiljer man mellan medelträffpunktens felläge och spridningen kring medelträffpunkten. Dessa fels storlek beror dels på hur känslig en viss projektil(bana) är för fel/avvikelse i en viss storhet, t.ex. utgångshastighet och dels på hur stor avvikelsen är. Om vi till att börja med betraktar tomrumsbanan såg vi att denna bestämdes endast av utgångshastighet och utgångsvinkel. Genom att t.ex. variera utgångshastigheten med 1 m/s vid en viss skottvidd/utgångsvinkel får man det som kallas för känsligheten för fel i utgångshastighet, V_0 ¹⁰². För en bana i atmosfären tillkommer ett stort antal andra faktorer, utöver mynningshastighet och utgångsvinkel., som t.ex. avvikelser från nominellt belopp vad gäller projektilmassa samt ett antal storheter som är förknippade med atmosfären som framför allt vind men också lufttryck, temperatur och luftfuktighet (eg. atmosfärens densitet).

Även om alla här beskrivna möjliga fel är eliminerade och banan är helt rätt för att träffa målet kan önskad brisadpunkt för, främst, splittergranater komma att ligga fel genom att tändröret som utlöser sprängladdningen har för dålig noggrannhet eller en felfunktion.

101. Se även Skjutlära för armén, Skjutlära A, M7742-186012; Skjutlära för luftvärnet, Skjutlära Lv, M7742-146001 och Artillerilära för KA, M7734-476008.

102. Som exempel kan nämnas att för Haubits 77B med ammunitionen sgr m/77B bfl är på max skjutavstånd ≈ 28 km känsligheten för fel i V_0 ca. 56 m/m/s och känsligheten för sidvind ca. 43 m/m/s. Spridningen (felet) i mynningshastighet är av storleksordningen 2-4 m/s. Att bedöma avvikelsen, från antaget, vad gäller vindstyrka är mycket svårt över ett område som sträcker sig i höjd ca. 28 km och i höjd ca. 11km.

Innerballistiska faktorer som varierar och ger variation i banan och träffpunkt (spridning) är (där vissa faktorer varierar från skott till skott medan andra bara varierar från pjäs till pjäs eller från gång till gång):

- Mynningshastighet; V_0 , (som i sin tur bl.a. påverkas av)
 - Krutets massa; ökad krutmassa ger ökat V_0 .
 - Krutets temperatur; förhöjd temperatur ger ökat V_0 .
 - Eldrörets slitage; med ökande slitage minskar V_0 .
 - Projektilens massa; ökande massa ger minskande V_0 .
 - Ev. skador på krutet som ger ändring i den brinnande ytan.

Övergångsballistiska faktorer som varierar och ger variation i banan och träffpunkt (spridning) är:

- Projektilens riktning, som beror bl.a. på:
 - Eldrörmynningsens riktning; oberoende hur inriktningen sker uppstår små avvikelser från den önskade inriktningen. Dessutom är pjäs och plattform ej helt stela system utan rör sig något under eldgivningen.
 - Projektilens riktning i eldröret; även om eldrör och projektil kan upplevas som mycket stela är de elastiska system och fjädrar något under eldgivningen.
- Projektilens rotationshastighet runt axlar vinkelrät mot längdaxeln (som liksom i föregående fall beror bl.a. på)
 - Eldrörmynningsens rörelse; pjäs och plattform är ej helt stela system utan rör sig något under eldgivningen.
 - Projektilens rörelse i eldröret enl. föregående pkt.
- Ytterballistiska faktorer som varierar och ger variation i banan och träffpunkt (spridning)
- Vidstyrka och riktning; projektilen ”driver med” vinden, förutsatt att den inte har drivning. För det fall den är driven kan den under drivtiden gå mot vinden!
- Projektilens massa, en större massa ger vid i övrigt lika förhållanden en mindre retardation och således längre skottvidd.
- Luftmotståndet på projektilen (som beror bl.a. av följande)

- Luftens densitet; högre densitet ger större motstånd och kortare skottvidd.
- Projektilens storlek (anges oftast som maximal tvärsnittsytta)
- Hur väl balanserad projektilen är

Då information om de ovannämnda storheterna saknas kommer medelträffpunkten till att börja med att ligga fel. Vid inriktning av ett eldrör sker korrektion med avseende på alla dessa faktorer så långt möjligt är, vilket gör att medelträffpunkten förhoppningsvis kommer att ligga där man önskar, men variationer från skott till skott förekommer alltid, vilket ger upphov till spridningen kring medelträffpunkten.

Av detta framgår att liten spridning inte nödvändigtvis är det mest önskvärda utan spridningens storlek bör, så långt möjligt är, ballanseras mot hur noga medelträffpunkten kan läggas i förhållande till önskad träffpunkt samt om det är ett eller fler elementarmål inom ett målområde.

Införs system för att öka skottvidden/minska skjuttiden kan det antingen ge upphov till ökad eller minskad känslig för ett fel.

10.7 Metoder att öka verkan hos eldrörsvapen

Att öka verkan av ett eldrörsvapen kan ha mycket olika innebörd beroende på vilket system det gäller. Utöver mycket viktiga faktorer som målinmätning (läge, och ev. hastighets riktning och storlek) och inriktning kan två huvudtyper av åtgärder särskiljas dels de som är förknippade med utskjutningen dels sådana som har med projektilbanan att göra.

Den första typen innebär att öka mynningshastigheten vilket i sin tur kan göras på ett antal olika sätt som att öka krutmängden, att använda ett mer energirikt krut, att förlänga eldröret eller/och, under vissa förutsättningar att, öka kalibern. Ett exempel på detta är artillerisystem där eldrörlängden på moderna 155 mm pjäser successivt ökats från 39 kaliber till 45 kaliber för att nu troligen som standard få 52 kalibers eldrörlängd. Samma utveckling har skett på stridsvagnskanoner och luftvärnspjäser. Helt nya utskjutningsmetoder, där elektrisk energi används i större eller mindre omfattning, studeras också för att uppnå högre mynningshastigheter. Exempel på detta är s.k. elektrotermisk-kemisk utskjutning och rälskanon.

De *åtgärder* som kan vidtas *på projektilen*, för att minska luftmotståndet och därmed retardationen, kan uppdelas i två olika typer nämligen åtgärder på projektilutformningen och införandet av någon typ av tillsatsaggregat. Vad gäller projektilutformning brukar följande åtgärder diskuteras:

- *Akterkon*; ofta ca 7° vinkel och 0,5-1,0 kaliber lång
- *Nosform*; allt längre och slankare nosformer har börjat införas. Exempel finns på granater vars ytterkontur i princip består av en lång nos och en akterkon
- *Underkalibrig projektil*; dvs. projektilkroppens diameter är mindre än eldrörets diameter, vilket ställer krav på speciella arrangemang, s.k. drivspeglar (sabot) i samband med utskjutningen. Används huvudsakligen som pansarbrytande projektiler, se avsnitt 3.1.3, till stridvagnskanoner men även för fin- och mellankalibervapen. Tillämpning för artillerigranater har diskuterats och provats.
- *Minskad projektilmassalökad densitet*; ett sätt att öka mynningshastigheten är att minska projektilmassan. Detta kombineras då oftast med att projektilen görs underkalibrig och för att minska den projicerade ytan och därmed luftmotståndet. Metoden är mest lämpad för inerta projektiler. Ett exempel är prickskytteammunition som har en underkalibrig projektil av tungmetall för att få hög mynningshastighet och liten retardation i banan vilket ger kort skjuttid och stort bestruket stycke. Minskad projektilmassa under i övrigt lika förhållanden ger minskat skjutavstånd!
- *Vingar*; Att förse en projektil med vingar är något som börjat diskuteras de senaste åren för att öka skottvidden för artilleriprojektiler. Vingförsedda artillerigranater kräver sannolikt någon typ av styrning i banan och närmar sig därigenom missiler.

De typer av *tillsatsaggregat* som främst diskuteras är:

- Raketmotor (reatil, RAP)
- Basflöde (BB, Base-Bleed, Base-Burning)
- Rammjetmotor

Raketmotorn var en av de första metoderna man använde för att öka skottvidden, utöver vad som kan åstadkommas genom åtgärder på pjäsen. Metoden används på ammunition för såväl lätta burna vapen, granatkastare som tungt artilleri. Är projektilen rotationsstabiliserad, som för artilleri, kommer dock raketmotorn att medföra att mindre sprängämnesmängd ryms i granaten. Raketmotorn tänds ofta en bit ut i banan och brinner under kort tid, någon eller några sekunder och ger därvid ett tillskott till projektilens hastighet.

Raketmotorer används även på t.ex. RSV-ammunition i rekylfria vapen som FFV 551 till Carl-Gustav (finns ej i Sverige), alltså där det inte är fråga om ett ”rent” raketvapen.

Basflöde är en teknik som lämpar sig huvudsakligen för artilleriet. En granat försedd med basflöde har en krutladdning, liknande raketmotorns, baktill i projektilen. Till skillnad från raketmotorn tänds detta aggregat i eldröret och brinner sedan under stor del av banan. Aggregatet ger ingen tillskottskraft men sänker motståndet på projektilens basplan varigenom skottvidden ökar.

Rammotorer är luftförbrukande motorer, som med väsentligt mindre bränsle än vad som används i en raketmotor skulle ge samma prestanda. Ännu finns, så vitt känt är, ingen eldrörutskjuten projektil med denna motortyp i operativt bruk.

De ovan diskuterade metoderna kan i de flesta fall kombineras på olika sätt, så t.ex. har en kombination av raketmotor och basflöde provats.

10.8 Övriga metoder

10.8.1 Sikten/centralinstrument

Den kanske viktigaste metoden att öka verkan av ett eldrörssystem är att säkerställa att man har tillförlitliga sikten. Exempel på förbättringar i sikten är att de görs avståndsmätande och vid rörliga mål också framförpunktsberäknande. Ytterligare förbättringar är att säkerställa att man erhåller ett bra meteorologiskt underlag, något som blir mer och mer väsentligt vid ökande skottvidder/skjuttider.

10.8.2 Bankorrigerig, målsökning, styrning

Ett sätt att höja träffsannolikheten för, och därmed verkan av, eldrörsvapen är att förse stridsdelen med någon typ av bankorrigerig som utifrån intern eller extern information styr projektilen till den tänkta (ideal)banan (träffpunkten). Exempel på detta är försök som gjort på artilleriprojektiler att förse dem med "luftbromsar" som korrigerar banan i längd (där spridningen är som störst) utifrån att banan mäts in och jämförs med den ideala banan.

Ett annat exempel på bankorrigerig är den av SAAB Bofors Dynamics utvecklade MBT LAW som beställts av såväl svenska som engelska försvaret. I detta fall kan dock diskuteras om man skall räkna detta som ett eldrörsvapen eller en missil.

Målsökning och styrning, speciellt i slutfasen av långa artilleribanor, har länge diskuterats och till delar också praktiserats. Ett tidigt exempel var den amerikanska artillerigranaten M 712 Copperhead som skjuts ur en 155 mm artilleripjäs och är försedd med en semi-aktiv lasermålsökare.

Ett senare exempel är den svenska slutfasstyrda granatkastargranaten "Strix" samt den under utveckling varande artillerigranaten "Excalibur".

10.8.3 MRSI

Ett sätt att för eldrörsartilleri öka verkan är att få samtidigt nedslag i målområdet av så många granater som möjligt och därigenom något efterlikna raketartilleriets egenskaper. Med modern automatisk laddning, riktning och snabba beräkningsmetoder kan detta till delar uppnås genom att från en och samma pjäs skjuts ett antal skott med olika elevation och mynningshastighet. Denna metod kallas MRSI, Multiple Round Simultaneous Impact.

10.9 Eldrörsvapen mot oskyddade och lätt skyddade markmål

Typiska vapen mot oskyddade och lätt skyddade punktmål är finkalibriga vapen. Med detta menas skjutvapen med eldrörskaliber mindre än 20 mm vilket innefattar soldatens personliga beväpning, s.k. eldhandvapen och kulsprutor. Begreppet eldhandvapen innefattar pistoler, gevär, automatgevär och kulsprutepistoler. I militära sammanhang är det personliga vapnet idag normalt en automatkarbin

Verkansdelen är en avlång spetsprojektil. Huvudanvändning har varit bekämpning av oskyddad trupp och obepansrade fordon. I takt med att såväl trupp som fordon försetts med skydd har kraven på finkalibriga projektilers förmåga att slå igenom dessa skydd ökat. En uppsjö av projektilvarianter har utvecklats för att möta dessa krav och skillnaden i prestanda är mycket stor beroende på kaliber, utskjutningshastighet och projektilkärnans utformning och material.

Soldaten, har under de senaste femtio åren försetts med bättre och bättre kroppsskydd och därmed blivit alltmer svårbekämpad. Huvuddelen av personskadorna i krig orsakas av splinter. Dessa kommer huvudsakligen från yttäckande stridsdelar såsom artillerigranater, flygbomber mm men också i form av sekundärsplinter som kastas ut från baksidan av det penetrerade skyddet. För att reducera skadorna har splitterskyddsvästar införts. Vid väpnad strid som förekommer vid t.ex. internationella operationer där soldaterna har ett annorlunda, mer polisiärt uppträdande, är även verkan från finkalibriga vapen ett stort hot. För att klara även detta hot förstärks kroppsskyddet på de mest sårbara ytorna med hårda skyddspaneler. För att kunna bekämpa soldater krävs därför nu att stridsdelar med större genomträngningsförmåga används vilket driver utvecklingen mot splinterstridsdelar med tyngre splinter respektive pansarbrytande projektiler.

En pistol är definitionsmässigt ett eldhandvapen som kan hanteras med endast en hand. Pistoler användes redan under 1500-talet. En vanlig armépistol väger ca 1 kg eller mindre, har 9 mm kaliber, ett magasin som rymmer 7-15 patroner och en utgångshastighet på 300-350 m/s.

Kalibern 9 mm är också den vanliga kalibern för kulsprutepistoler, även kallat kpist, som är ett automatiskt eldhandvapen för pistolammunition. De första kulsprutepistolerna konstruerades i Tyskland mot slutet av första världskriget och anskaffades i mycket stort antal av de krigförande under andra världskriget. Kpisten ger något högre utgångshastighet än pistoler men de är båda att betrakta som närstridsvapen. Den svenska kpist m/45 väger 4,5 kg, har ett magasin för 36 patroner och en utgångshastighet av 420 m/s. De senaste decennierna har en ny typ av vapen utvecklats med benämning ”Personal Defence Weapons” (PDW). Tanken med PDW-konceptet är att pistoler och kpistar skall ersättas med kompakta och effektiva vapen som personligt försvarsvapen.

Gevär är definitionsmässigt ett eldhandvapen som hanteras med båda händerna och består av pipa, lås eller mekanism, stock med beslag och riktmedel i form av sikte och korn. Moderna gevär är helautomatiska, vilket innebär att laddning, mekanismens stängning, avfyring, mekanismens öppnande och tomhylsans utkastande sker automatiskt. De kan skjuta eldskurar eller ställas om till patronvis eld. En automatkarbin är kortare än ett gevär.

De idag vanligaste kalibrarna på automatkarbiner är 7,62, 5,56 och 5,45 mm. NATO introducerade år 1952 en 7,62 mm patron med längden 51 mm som standard. Denna användes i den svenska automatkarbin Ak-4 och används fortfarande av många länder såväl inom som utom NATO.

Dåvarande Warszawapakten (WP) använde samma kaliber men valde en patron som var kortare, 39 mm, och därigenom lättare men med mindre verkan och verkansavstånd. ”Automat Kalashnikov 1947” (AK 47) som använder sådana projektiler har blivit ett av de mest använda vapnen i världen.

Projektiler i kaliber 7,62 mm är relativt tunga och överdimensionerade för verkan mot mjuka mål. Detta innebär onödigt tunga vapen och tung ammunition mot sådana mål. År 1980 införde NATO därför kaliber 5,56 mm som ny standard för sina automatkarbiner och några år tidigare beslutade WP att övergå till kalibern 5,45 mm varvid den sovjetiska automatkarbinen Ak 74 utvecklades. Dessa projektiler kompenserar sin lägre massa med högre utgångshastighet (900-1000 m/s). Sverige beslutade 1983 att anskaffa en ny 5,56 mm automatkarbin (Ak 5).

I det tidigare ”östblocket” finns också en grövre ammunitionstyp i kaliber 7,62 mm, 7,62×54R, främst avsedd för kulsprutor.

För att öka penetrationsförmågan i kroppsskydd m.m. används idag oftast stål kärnprojektiler med varierande hårdhet i stället för bly. Det förekommer också pansarbrytande varianter med hårdmetallkärnor.

Utvecklingstendensen för automatkarbinerna är, liksom för pistoler och kulsprutepistoler, en strävan att erhålla kompaktare och mer lätthanterliga vapen med bättre riktmedel.

Automatkarbiner kan också förses med granattillsatser för utskjutning av små splitter- eller RSV-stridsdelar.

En kulspruta är ett helautomatiskt skjutvapen med hög eldhastighet som matas med gevärspatroner som är fästade vid ett band. Lätta kulsprutor har i allmänhet kalibern 5,56 mm t.ex. ksp 90. Kulsprutor med kalibern 7,62 mm benstöd och som väger ca 10 kg kallas ofta (i utländsk litteratur) för GPMG (General Purpose Machine Gun). Tunga kulsprutor med 12,7 mm eller 14,5 mm kaliber ingår i pansrade stridsfordons beväpning. Tunga kulsprutor och prickskyttevapen är i första avsedda för bekämpning av materiel. De kan dock genom sin långa räckvidd vara aktuella för bekämpning av trupp.

De tyngre finkalibriga vapnen, kulsprutor och prickskyttegevär är främst avsedda för bekämpning av materiel såsom lätt pansrade fordon. Med pansarbrytande ammunition i kalibrarna 7,62 mm, 12,7 mm eller 14,5 mm kan man med dessa vapen bekämpa lätt pansrade fordon.

Den ryska kaliber 7,62×54R¹⁰³ har sitt ursprung i det ryska geväret Mosin-Nagant M1891 och torde vara den äldsta vanligen förekommande kalibern i militärt bruk. Det halvautomatiska prickskyttegeväret SVD (Dragunov) är ofta, trots att prickskyttnar knappast utgör samma militära volymhot som kulsprutor, det vapen som i första hand associeras med kalibern. Andra exempel på vapen i denna kaliber är de olika varianterna av kulsprutan PK som finns för såväl infanteribruk som fordonsmontage.

Exempel på i västvärlden förekommande kulsprutor i kalibern 7,62×51 mm är belgiska FN MAG58 (svensk ksp58) och amerikanska M60. Kalibern kan prestandamässigt jämföras med den ryska 7,62×54R.

Kaliber 12,7×99 mm är den helt dominerande tunga kulsprutekalibern i väst. Ett mycket spritt vapen i kalibern är den gamla kulsprutan M2, som bestyckar allt ifrån stridsbåtar till stridsfordon och flygplan. Denna vapentyp är även i svensk tjänst under benämningen Tksp 12,7.

Utöver kulsprutor har de senaste decennierna intresset för tunga prickskyttevapen i denna kaliber ökat kraftigt och en stor mängd vapen finns utvecklade. Exempel på dessa är t.ex. det halvautomatiska amerikanska geväret Barrett M82A1 (svensk AG 90) och Accuracy International AW50. Vapen av denna typ kan bäras av en man och medger bekämpning av t.ex. lättare pansarfordon på långa avstånd.

Kalibern 12,7×108 mm är östblockets motsvarighet till västvärldens 12,7×99 mm. Ammunition av denna typ skjuts bland annat i kulsprutan NSVT, som utgör sekundärbeväpning på många sovjetiska/ryska stridsvagnar,

103. Första siffran anger eldrörskaliber (diameter mellan bomarna) medan den andra siffran anger totala skottets längd. R står för rimmed (randpatron) och betyder att hylsan har en fläns istället för utdragarspår. I militära sammanhang är länder från det tidigare östblocket ensamma om att ha kvar denna lösning.

i den helikopterburna gatlingkulsprutan och i tunga prickskyttegevär. Kalibern har länge varit en standardkaliber i länder med militärteknisk koppling till det gamla Sovjetunionen och är därför mycket spridd över stora delar av världen. Prestandamässigt är den relativt likvärdig 12,7×99 mm NATO.

Kaliber 14,5×114 mm som ursprungligen togs fram under andra världskriget för bekämpning av tyska stridsvagnar förekommer fortfarande i ett flertal vanliga vapensystem. Exempel på dessa är kulsprutan KPVT, som används på ryska pansarskyttefordon, luftvärnskulsprutan ZPU, och den marina MTPU. Det förekommer också moderna prickskyttevapen i kalibern.

Indirekt eld (artilleri och granatkastare) infördes som ett dominerande stridsmedel under första världskriget då TNT (trotyl) möjliggjorde framtagning av effektiva spränggranater och huvudmålet var trupp i skyttegravar. Tidigare ytäckande vapen mot truppmål var kanoner med granatkartescher där man med direktriktad eld spred ut splinter, likt en hagelbössa, mot synliga mål.

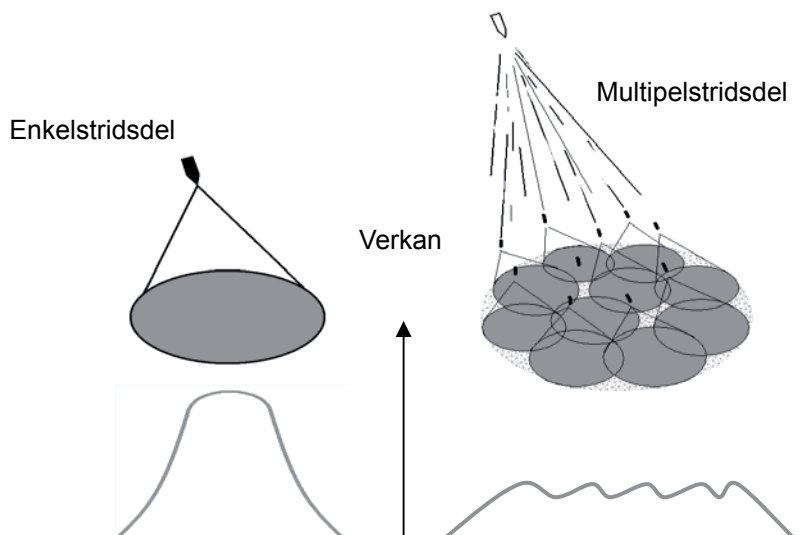
Under och efter andra världskriget kompletterades den indirekta elden med flygbombningar som huvudmetod att bekämpa truppmål över större ytor. Detta visade sig vara så effektivt att trupperna måste spridas ut över stora ytor och förses med olika typer av ballistiskt skydd. Ytbekämpning av truppmål har därmed blivit väsentligt svårare än tidigare.

Splinterstridsdelar är de vanligast förekommande ytäckande stridsdelstyperna. Indirekt eld skjuts med eldrörs- och raketartilleri eller granatkastare. Spränggranater finns också till flertalet grövre direkteldsvapen som stridsvagnskanoner, mellankalibriga automatkanoner och rekylfria pv-vapen. Förutom splinterstridsdelar kan även tryck- och brandstridsdelar användas som ytäckande vapen för bekämpning av trupp.

Nära en spränggranat slås trupp ut av såväl tryck- som splinterverkan, men tryckverkan avtar mycket snabbt med avståndet till detonationspunkten varför den huvudsakliga verkan på större avstånd åstadkoms av splinter. Äldre splinterstridsdelar initierades främst via anslag. Numera kan man välja initieringsanordning beroende på vilket mål som skall bekämpas. Är uppgiften att bekämpa trupp, föredrar man att låta brisaden äga rum när projektilen har ett antal meter kvar till målet, för att få bättre spridning av splittren. Genom införande av tidrör eller zonströr åstadkoms luftbrisad vilket ger ett väsentligt större antal verksamma splinter. Ett zonströr känner av avståndet till marken och gör att stridsdelen briserar på lämplig höjd.

Då huvuduppgiften var att bekämpa oskyddad trupp gick utvecklingen mot stridsdelar som optimerats för att ge många och små splinter. Införandet av kroppsskydd gör att dagens granater optimeras för att ge större splinter, och det visar sig att äldre granattyper ofta är effektivare mot trupp med kroppsskydd än senare varianter.

För att erhålla bättre yttäckning kan större stridsdelar utformas som multipelstridsdelar där verkansdelen delas upp i ett antal mindre delar, så kallade substridsdelar. Dessa sprids ut från huvudstridsdelen innan denna når målet.



Figur 10.2. Effekt och "verkansyta" för single- resp. multipelstridsdel. Multipelstridsdelen ger en större "verkansyta" med lägre, men tillräcklig, verkan till skillnad mot singelstridsdelen som ger kraftig "over-kill" inom en stor del av sitt verkansområde. (Källa: FOI)

Multipelstridsdelar är relativt avancerade och dyra för bekämpning av trupp och substridsdelarna är ofta förfragmenterade för att täcka den bekämpade ytan med splitter som ger optimal verkan mot den avsedda måltypen. Det finns substridsdelar som även har RSV-verkan för att också kunna bekämpa pansrade mål.

Granatkastarens styrka ligger i dess enkla konstruktion, låga pris, låga vikt och höga eldhastighet. Granatkastarens svaga sidor är främst kort skottvidd och liten verkan av det enskilda skottet. Granatkastare finns i ett stort antal utföranden med kalibrar från <math><50\text{ mm}</math> till >math>>24\text{ cm}</math>. Vanligast är granatkastare i kalibrarna 8 eller 12 cm och som hanteras manuellt av sin besättning. I utländska mekaniserade förband är ofta granatkastarna monterade i trupputrymmet på enklare pansarskyttefordon i syfte att minska grupperingstiden och ge besättningen splitterskydd.

Ett ny splitterskyddad granatkastare, AMOS (Advanced Mortar System), är (år 2007) under utveckling i samarbete mellan Sverige och Finland. De tilltänkta plattformarna för AMOS är strf 90 (band) och PASI XA-203 (hjul). AMOS är bakladdad och har dubbla eldrör för att medge en högre eldhastighet (24 sk/min). Skottvidden på AMOS kommer tack vare de 3 m långa eldrören

bli ca 10 km med dagens sgr. AMOS kommer att vara försedd med autonoma elldlednings- och navigationssystem. Den kan även avge direktriaktad eld. Både arméns jägarförband och marinens amfibiebat använder den burna lättvikts 8 cm grk m/84. Tack vare modernare ammunition har denna 8 cm grk nästan lika stor räckvidd (5,8 km) som arméns gamla 12 cm grk m/41D (6 km).

Till granatkastare finns förutom spränggranat, sgr, även lys- och rökgranater. För att förbättra splitterspridningen för sgr monteras ofta ett spröt i spetsen på tändröret vilket gör att brisaden sker några dm över markytan. Till arméns 12 cm grk har utvecklats den IR-målsökande hårdmålsgranaten psvinggr 94 Strix, vars stridsdel är en strålbildande RSV, se avsnitt 3.3.1. Även substridsdelgranater förekommer.

Haubitser är pjäser som i första hand använder undergradsbanor med nedslagsvinklar $> 25^\circ$ (kastbanor) men som vanligtvis också kan använda övergradsbanor. Haubitsen används för ytmålsbekämpning och är den vanligaste fältartilleripjäsen. Till haubitser finns ett stort antal olika granattyper.

Den traditionella haubitsen hade ett relativt kort eldrör jämfört med kanoner. Gränsen mellan haubitser och kanoner kunde länge anges i förhållandet mellan eldrörets längd och kaliber. Utvecklingen av långskjutande fälthaubitser med allt längre eldrör har gjort att en sådan gränsdragning inte längre är meningsfull.

Utvecklingen av moderna fältartilleripjäser styrs idag starkt av en industristandard benämnd JBA (Joint Ballistic Agreement) eller JBMoU (Joint Ballistic Memory of Understanding). Enligt denna standard skall kalibern vara 155 mm och eldrörlängden L52. Den ryska standarden för haubitskalibrar har länge varit 122 och 152 mm. För att öka möjligheten till export har idag även vapentillverkare inom det f.d. östblocket börjat anpassa sig till JBA. Utöver 155 mm artilleri är, i ”väst”, också 105 mm vanligt förekommande. Mycket arbete pågår för att öka räckvidden på denna typ av artilleri. Det man förlorar i form av räckvidd och (enskilda skottets) verkan upphävs i vissa situationer av att pjäserna är mycket lättare och därmed mer lättrörliga och lätta att t.ex. flygtransportera.

Ammunitionen till haubitser utgörs fortfarande främst av spränggranater, se avsnitt 3.2. Vanligt är numera också s.k. ”Dual-Purpose Improved Conventional Munitions”, DPICM, vilket är en bärgranat, som innehåller ett antal substridsdelar, vilka främst verkar genom strålbildande RSV, men också, eftersom skalet är förfragmenterat, genom splitter. Den strålbildande RSV:n är tänkt att slå genom taket på olika typer av stridsfordon. En 155 mm granat (t.ex. M 483) kan innehålla upp till 88 st. substridsdelar med kalibern 38 mm.

Speciellt till grövre artilleri, > 155 mm, förekommer i stort sett alla tänkbara typer av ammunition, utöver lys- och rökgranater finns slutfas- eller banstyrda granater med strålbildande RSV samt bärgranater med målavkännande sub-

stridsdelar t.ex. Bonus, vilka verkar genom projektilbildande RSV. Vidare finns det (har funnits) nukleära granater och granater med kemiska stridsdelar.

Raketartilleri kännetecknas av att de momentant kan ge mycket hög verkan. Raketens nackdel har varit att den haft sämre precision än eldrörartilleriet. Genom införande av styr- och korrigeringsmetoder kan här, liksom i fallet med haubitzammunitionen, precisionen höjas väsentligt. Ett exempel på en modern artilleriraket är den amerikanska MLRS. Stridsdelarna till artilleriraketer är oftast i princip lika eldrörsartilleriets, men lastförmågan i varje raket kan vara mycket större än i en granat så t.ex. kan en MLRS-raket innehålla 644 st. 38 mm substridsdelar av samma typ som ovannämnda granat M483.

10.10 Eldrörsvapen mot pansrade markfordon

Pansrade markfordon har traditionellt definierats som fordon som försetts med någon form av ballistiskt skydd. Eftersom man på senare tid infört ballistiska skydd även på transportfordon och andra lättare fordon faller i stort sett alla militära fordon numera under denna definition. Vi väljer här att i stället använda begreppet stridsfordon som omfattar lätta och tunga stridsfordon.

De vapensystem som framtagits för att bekämpa stridsfordon kallas pansarvärnsvapen vanligen förkortat till pv-vapen. De är främst RSV-vapen och vapen för utskjutning av tyngre pansarbrytande projektiler. Dessa verkar genom att penetrera det ballistiska skyddet och slå ut inre komponenter så att fordonet sätts ur stridbart skick. Av logistiska skäl har man normalt inte olika pv-vapen mot olika fordonstyper och eftersom de bäst skyddade fordonen, stridsvagnarna, är svårpenetrerade konstrueras pv-vapnen oftast för optimal penetration.

Stridsfordonen har normalt huvuddelen av sitt skydd i frontsektorn. För att få erforderlig verkan saknar många vapen tillräcklig förmåga att penetrera fronten på stridsfordonen. De måste då träffa i sidan, bakifrån, ovanifrån eller underifrån. Träff i sida av vagn kan erhållas med sidverkande minor och genom rätt stridsteknik med pv-vapnet. Träff i taket kan fås genom direktriktade överflygande RSV-vapen, indirekta RSV-vapen (t.ex. ”Bonus”) eller attack från flyg med automatkanoneld, pansarvärnsmissiler eller multipelbomber. Dessa vapentyper samt förhållandet att strid i bebyggelse blivit alltmer vanligt har drivit på utvecklingen av det ballistiska fordonsskyddet så att man nu strävar efter att få likvärdigt skydd i alla riktningar.

Det finns nu också pansarbrytande finkalibrig ammunition till eldhandvapen som har så stor genomslagsförmåga att de klarar att bekämpa lättare pansrade fordon.

Den svårskyddade botten på fordonet kan bekämpas effektivt med fordonsminor. Utvecklingen på minområdet går från tryckverkande minor som stoppar

fordonet genom att slå ut dess band eller hjul, mot minor som genom kombinerade penetrations- och tryckverkanseffekter slår ut hela fordonet.

Eftersom moderna pansarskyddslösningar är inriktade på att förhindra penetration in i vagnen kan även vapen som slår ut yttre komponenter vara ett alternativ för att slå ut pansrade fordon. Exempel på sådana komponenter är sikten, sensorer m.m. som kan slås ut med vanliga splinterstridsdelar från såväl direkt som indirekt eld eller mer specialinriktade åtgärder.

Världens första pv-vapen byggt på RSV-principen blev det tyska "Panzerfaust" som kom i början på 1940-talet. RSV-vapnen fick alltmer ökad betydelse under senare delen av andra världskriget och kom till stor användning mot stridsvagnar och befästningar. Dåtidens laddningar kunde penetrera 2-3 gånger sin egen kaliber i stål.

"Panzerfaust" var ett exempel på ett rekylfritt, bärbart engångsvapen. Dess stridsdel var överkalibrig, vilket innebär att stridsdelens kaliber var större än utskjutningsrörets och alltså låg framför eldröret redan före utskjutningen. Ett stort antal vapen av motsvarande typ, dock inte alltid med överkalibrig stridsdel, har sedan utvecklats och används världen över.

Det vanligaste hotet mot stridsfordon vid internationella operationer är för närvarande raketgeväret RPG-7. Det introducerades i Sovjetunionen 1962 och finns nu i stort antal i alla världens oroshärdar. Detta är ett mycket enkelt, billigt och funktionellt vapen som har en effektiv räckvidd på upp mot 500 m och skjuter iväg en RSV-stridsdel med 85 mm kaliber med en genomslagsförmåga kring 300 mm pansarstål. Vapnet inklusive raket väger ca 8,6 kg och kräver ett tvåmansteam, en som bär vapnet och en som bär raketerna.

En västerländsk motsvarighet till RPG-7 är den svenska AT-4 (pansarskott m/86) som också används av USA. AT-4 är ett rekylfritt engångsvapen som kastas efter avfyring. Det är ett enmansvapen som är mycket lätt att använda även för en ovan skytt. Vapnet kan även användas som syftmina. Stridsdelen har kalibern 84 mm och en genomslagsförmåga på ca 400 mm pansarstål. Den taktiska räckvidden uppges till 250 m. Det finns också en speciell variant framtagen till strid i bebyggelse, kallad AT-4 CS (engelskans "Confined Spaces"), se *Figur 10.1* i avsnitt 10.3, som kan avfyras i trånga utrymmen.

Ett betydligt äldre vapen med mycket vidsträckt användning är granatgevär, grg m/48 som har samma kaliber. Det finns senare versioner som är lättare, grg m/86. Till dessa vapen är pansarbrytande RSV-ammunition den huvudsakliga ammunitionen men också många andra typer av ammunition finns. Till vapnet finns pv-ammunition med såväl som utan både raketmotor och tandemladdningar också stridsdelar vars sprängämne uppfyller krav som ställs på s.k. IM-ammunition ("Insensitive Munition"). Vapnet och ammunitionen synes, trots sin ålder, vara under ständig utveckling.

I och med att nya pansartyper, som sammansatt pansar och reaktivt pansar, har kommit på moderna stridsfordon har utvecklingen av RSV-stridsdelar mer och mer inriktats mot att ta fram utföranden som är bra mot dessa pansartyper i stället för att som tidigare mest ha handlat om att maximera genomslaget i pansarstål.

Pansarbrytande projektiler avsedda att verka mot stridsfordon skjuts med grov- och mellankalibriga högtryckskanoner eller höghastighetsraketer. Grovkalibriga kanoner, har en kaliber > 60 mm. Idag har dessa vapen vanligen kalibrar mellan 10,5-12,5 cm. Med mellankalibriga kanoner avses kanoner med kalibrar mellan 20 och 60 mm. För att erhålla högre projektilhastigheter studeras olika möjligheter t.ex. att använda elektrisk energi, se avsnitt 10.7.

Tyngre pansarbrytande projektiler optimerade för pansargenomslag utformas numera som långa slanka pilar och ges mycket hög hastighet.

Om man inför kanontyper som ger betydligt högre projektilhastigheter än dagens kanoner kan även andra geometriska utformningar av projektilerna än pilar bli aktuella. Exempel på sådana är segmenterade projektiler och teleskopprojektiler.

De tyngre finkalibriga vapnen, kulsprutor och prickskyttegevär är främst avsedda för bekämpning av materiel såsom lätt pansrade fordon. Med pansarbrytande ammunition i kalibrarna 7,62 mm, 12,7 mm eller 14,5 mm kan man med dessa vapen penetrera lätt pansrade fordon, se vidare avsnitt 14.3.

Såväl lättare pansrade fordon som attackflygplan kan vara utrustade med mellankalibriga kanoner avsedda att skjuta pansarbrytande projektiler. En stor fördel med automatkanoner är att man i samma salva kan skjuta avriggnings- och verkansskott. Stridsfordon 90 med sin 40 mm akan utgör ett bra exempel på stridsfordon som är utrustad med en mellankalibrig kanon. Med kanonen kan man skjuta både splitterbildande granater och underkalibriga pilprojektiler.

Kanoner är pjäser som är konstruerade för flackbaneeld (jmf. avsnitt 10.5) och främst används för att bekämpa punktmål. Kännetecknande för moderna kanoner är att de som regel bara har en enda storlek på drivladdningen, hög eldhastighet och främst används för direktriktad eld. Denna typ av kanoner finns i t.ex. i stridsvagnar och på fartyg, samt tidigare som luftvärnspjäser som värnspjäser och som kustartilleripjäser. Inom armén förekommer kanoner främst i stridsfordon.

Grovkalibriga kanoner kräver en tung vapenbärare för att klara de stora rekylkrafterna. Dessa kanoner är som regel enskottsvapen till skillnad mot mellankalibriga kanoner som nästan alla är automatkanoner.

För att öka verkan i lättare pansrade fordon förses mellan- och grovkalibriga kanoner även med halvpansggranater och/eller ”multipurpose ammunition” som tränger in i och detonerar inne i vagnen.

Höghastighetsraketer utvecklas för att kunna skjuta tyngre pansarbrytande projektiler med vapen avsedda att bäras av lätta fordon. Raketerna skjuts ur ett

rekylfritt eldrör och fortsätter därefter att accelerera i banan med hjälp av en krutraketmotor. En stor fördel med höghastighetsraketer är att de accelerationer som uppstår i eldröret blir väsentligt mindre än i högtryckskanoner. Detta ger större frihet att konstruera projektiler med god verkan i målet. Även styrbara stridsdelar har studerats/utvecklats. Dessa kallas ofta HVM, High Velocity Missile. Ett exempel är den amerikanska LOSAT.

10.11 Eldrörsvapen mot ytfartyg

Under segelfartygens tid fram till mitten på 1800-talet användes i huvudsak samma typer av vapen och ammunition mot sjömål som mot markmål. Det fanns även särskild ammunition för att rigga av fartygen, genom att masterna fälldes, som bestod av kanonkulor förbundna till varandra med kedjor. Dessutom användes brandstridsdelar i stor utsträckning eftersom fartygen var av trä och dessutom hade stora mängder lättantändligt svartkrut ombord.

Motordrivna ytfartyg med olika grad av bepansring började införas under senare hälften av 1800-talet vilket ledde till att speciella pansarbrytande stridsdelar infördes. Dessa sjömålsgranater var dels homogena stålgranater för att slå igenom starkt bepansrade fartyg och dels halvpansargranater som efter genomslag detonerade inne i målet. Pansarbrytande stridsdelar infördes således först för bekämpning av sjömål och ett halvsekel senare (första världskriget) mot markmål. De slagskepp som användes under första och andra världskriget var mycket tjockt bepansrade och kunde endast bekämpas med tunga flygbomber och mycket grovkalibriga kanoner, t.ex. 40 cm kaliber på amerikanska slagskepp från andra världskriget.

Moderna ytfartyg har tunna skrov och bygger sin överlevnad bl.a. på att undgå upptäckt genom: signaturanpassning, taktiskt uppträdande, hög hastighet och god manövrerbarhet, vattentäta skott, redundans etc.

Eldrörsvapen mot sjömål utgörs oftast av automatkanoner med måttlig kaliber, 40 till drygt 120 mm, med sjömålsgranater (= en typ av halvpansargranater) som ger tryck- och splittrerverkan inne i fartyget. Bofors 57 mm pjäs är ett exempel på pjäs som används mot både luftmål (se nedan) och sjömål dock med olika ammunition.

10.12 Eldrörsvapen mot luftmål

Första gången flygplan användes militärt i större skala var i första världskriget. Flygplanen bekämpades då med markmålsvapen såsom eldhandvapen, kulsprutor och mellankalibriga kanoner. Kulsprutor användes både från marken och från andra flygplan.

Vid andra världskrigets början hade vapen och ammunition optimerats för verkan i luftmål. Dessa omfattade såväl snabbskjutande kulsprutor för närförsvaret och jakt som mellankalibriga automatkanoner och grovkalibriga enskottsvapen för bekämpning av flygplan på större avstånd. Ammunitionen var antingen inerta projektiler eller för de grövre vapnen spränggranater. Dessa kunde vara tidrörsinitierade eller anslagsinitierade. Under kriget tillkom 20 och 40 mm automatkanoner med hög eldhastighet och anslagsinitierade spränggranater. Ett av andra världskrigets största tekniska framsteg var zornöret som ökade nedskjutningssannolikheten väsentligt. Andra vapen som användes var ostyrda raketer som sköts både från marken och från flygplan.

Målsökande missiler utvecklades under andra världskriget men endast ett litet antal kom då till operativ användning. Under efterkrigstiden har denna typ av vapen mer och mer kommit att bli det dominerande luftförsvarsvapnet för främst flygbaserade system.

Moderna lv-stridsdelar är normalt förfragmenterade splinterstridsdelar, se avsnitt 3.2, som ger många små splinter då flertalet av dagens luftmål inte har något ballistiskt skydd och till stor del bygger sin överlevnad på att undvika att träffas samt på redundans för viktigare funktioner. Även KE- och RSV-stridsdelar används. KE-stridsdelar i kanoner med mindre kaliber, t.ex. sådana som används av jaktflygplan.

Utvecklingen på splinterstridsdelar har för luftvärnskanoner gått från anslags- eller tidrörsinitierade, naturligt fragmenterade stålgranater till zornörsinitierade, förfragmenterade granater med tungmetallsplinter.

De finns två typer av eldrör mot luftmål dels luftvärnskanoner, dels automatkanoner, även i flygplan. De luftvärnspjäser som idag används är automatkanoner med en kaliber på 20-57 mm. Mindre kaliber förekommer också, t.ex. 12,7 mm kvadrupelpjäsa HT 16 (Frankrike) och 14,5 mm XPU, 1, 2, 4 (Ryssland), men hänförs i allmänhet till samma kategori som eldhandvapen och kulsprutor.

De flesta lvakansystemen har någon form av eldledningsutrustning. I sin enklaste form kan detta vara en avståndsmätare med tillhörande kalkylator till mer avancerade som har följ radarar med avancerade kalkylatorer som kan beräkna framförpunkten även om målet svänger. Dagens lvakansystem kan m.a.p. ammunitionen grovt indelas i två grupper.

1. Akan i kalibrar 20-30 mm med enkel ammunition men mycket hög eldhastighet, t.ex. ZSU 23-4 och 27 mm Mauser BK i JAS. Hit kan också pjäser av typen M61 Vulcan Gatling gun och GAU-8/A Avenger 30 mm Gatling gun som ingår i olika system räknas.
2. Akan i kalibrar 30-57 mm med zornörsam och relativt låg eldhastighet, t.ex.

Bofors 40 och 57mm system eller Oerilkons 35mm system. Eldrörsluftvärn kan även användas för direktriktad eld mot markmål. Med lämplig ammunition kan en lvakan ha god verkan mot pansarskyttefordon och andra halvhårda mål.

Ett exempel på ett modernt lvakansystem är Lvkv 90 som är ett mörkersystem uppbyggt på stridsfordon 90. Lvkv 90 är utrustad med en 40 mm automatkanon (ak 40/70B), lokalspaningsradar (PS 95), sikte med IRV och laseravståndsmätare samt pjäsdator.

Ak 40/70B är en väl beprövad kanon som i lvkv 90 av utrymmesskäl monterats upp och ned. Till akan finns ett stort antal olika ammunitionslag; sgr, kulsgr med zonrör, 3P-granat (Prefragmented Programmable Proximity-fused), pilprj och övningsam.

Lvkv 90 kan radarspana under gång och har möjlighet att följa upp till 6 mål med räckvidd på 15 km. Radarn har möjlighet att detektera hovrande helikoptrar. Radarn ger invisning i sida men skytten måste själv optiskt fånga målet i höjd. Radarn har en särskild mod för att upptäcka hovrande helikoptrar. IRV-kameran ger möjlighet till målföljning under mörker och till viss del i nedsatt sikt (jmf RBS 90).

Lvkv 90 måste vid eldgivning stå stilla. Tiden från körning till skott är ca 7 sek. Vagnen kan inte sända eller motta måldata från andra vagnar eller radarstationer.

11. Missilteknik

I Sverige benämns ofta en missil för robot och följaktligen har nog läsaren förväntat sig att i denna volym av Lärobok i Militärteknik finna ett kapitel om just robotteknik; i synnerhet som alla våra svenska missilssystem har akronymen RBS följt av en nummerbeteckning, t.ex. RBS 15 liksom att själva missilen ofta har beteckningen RB, t.ex. RB 98. Ordet *robot* kan härledas från den tjeckiske dramatikern Karel Capek som skapade ordet för att i ett teaterstycke uppfört 1923 illustrera den mekaniska människan, arbetsslaven. Då ordet alltmer fått denna betydelse i takt med samhällets automation med bl.a. industrirobotar och autonoma system inkl. farkoster, så har jag valt att för militära robotvapen nyttja beteckningen missil. Detta är f.ö. i samklang med gängse anglosaxiskt språkbruk. Notera dock att man i det engelska språket med ordet "missile" oftast även innefattar raketer och pansarskott etc. Önskar man enbart tala om det vi i detta kapitel behandlar, missiler, så bör man använda termen "guided missiles". Nedanstående framställning är i huvudsak hämtad från FOA 1968¹⁰⁴, Axberg 2001¹⁰⁵, Fleeman et al 2001¹⁰⁶ och Törnblom 2007¹⁰⁷.

104. FOA, 1968: *Robotvapen*. FOA orienterar om. Vol. 9. Försvarets forskningsanstalt. Stockholm.

105. Axberg, S. (2001). *Om missilerna kommer*. I "Missilhot mot Sverige." Forsvarsberedningens skrifter 2/2001. Stockholm.

106. Fleeman, E., Berglund, E. & Licata, W., 2001: *Technologies for Future Precision Strike Missile Systems*. RTO-EN-018. AC/323 (SCI-087 bis)TP/37. RTO/NATO. Neuilly-sur-Seine.

107. Törnblom, H., 2007: *Robotteknik allmän kurs*. Utkast till kurskompendium för Chefsprogrammet. Version 0.26. Försvvarshögskolan. Stockholm.

11.1 Missiler

Vad är då en missil? Själva ordet missil kommer från latinets *missilia* som betyder kastvapen. En enkel definition beskriver en missil som ett avlångt vapen med förmåga att flyga långt och som exploderar i målet. En något mer fullständig definition av missil är "Ett obemannat självgående föremål som avskjuts, utslungas eller fälls, avsett att röra sig i en bana helt eller delvis över jordens yta, styrt genom signaler utifrån eller från inbyggda egna organ". Man kan konstatera att det finns tre egenskaper som sammantagna särpräglar en missil, nämligen att den *är obemannad*, att den *kan flyga* och att den *kan styras* i sin bana.

När det gäller indelning, kategorisering av missiler är det enkelt att konstatera att vare sig logik eller konsekvens är särskilt framträdande i befintliga indelningar. Missiler kan t.ex. indelas efter målkategori som sjösmål, luftmål och markmål. En annan skärning är efter den vapengren där de förekommer såsom armésystem, marina system och flygvapensystem. Vidare kan missilerna indelas efter det element och eller den plattform de avfyras från och i vilket element målet uppträder liksom vilken plattform som utgör mål. Exempel på sådan missilkategorier finns främst i US/NATO som t.ex. Air-to-Air Missile (AAM), Surface-to-Air Missile (SAM), Ship-to-Ship Missile (SSM), Air-to-Ground Missile (AGM), Ship-launched-Land-Attack Missile (SLAM), Sea-to-Ground Missile (SGM). I Sverige hade man tidigare en indelning i fyra typer baserad på missilens räckvidd, där typ I hade en räckvidd över 50 km, typ II mellan 15 och 50 km, typ III mellan 5 och 15 km och typ IV kortare räckvidd än 5 km. Av såväl internationella komparabilitetssträvanden som tekniska hänsyn har denna indelning numera helt övergivits till förmån för en mer förmågebaserad indelning, nämligen pansarvärns-, luftvärns-, jakt- och attackmissiler. Jag har valt att nedan närmare beskriva missilerna utifrån denna indelningsgrund utom vad avser kategorin attackmissiler som jag, för att upprätthålla indelningens tradition, ersätter med de numera vanligare begreppen kryssningsmissiler och ballistiska missiler. Det blir således i denna lärobok fem missilkategorier, nämligen

- Pansarvärnsmissiler
- Luftvärnsmissiler
- Jaktmissiler
- Kryssningsmissiler
- Ballistiska missiler

En *pansarvärnsmissil* är, såsom framgår av namnet, särskilt ägnad åt att bekämpa bepansrade fordon. Denna uppgift ställer särskilda krav på stridsdelen, liksom missilsystemets rörlighet. Pansarvärnsmissiler finns i alla storlekar från system som kan bäras av en enskild soldat till större system monterade på markfordon, flygplan, helikopter eller UAV (obemannad flygfarkost). Typiskt är en pansarvärnsmissil 1-1,5 m lång med en diameter kring 0,15 m. Oftast är de kommandostyrda via tråd och har en räckvidd på ca 2-3 km. Större system kan nå upp till 8 km. Ett fåtal system har målsökare.

En *luftvärnsmissil* karaktäriseras av dess förmåga att bekämpa luftmål, såväl flygfarkoster som missiler. Dessa missilsystem finns på rörliga plattformar som fartyg och landfarkoster men även som fasta försvarssystem. Enklare system med begränsade prestanda, främst vad avser räckvidd, kan bäras och hanteras av enskild soldat. Missilerna varierar kraftigt i såväl storlek som prestanda. Typiskt för de avancerade systemen är hög överljudhastighet ($M=2-4$) ($M=\text{Machtal} = [\text{flyghastighet}/\text{ljudhastighet (i omgivande luft)}]$), zonrörsutlöst splitterstridsdel, mycket god manöverförmåga (tvärsacceleration upp till 70 g). Dimensionerna varierar från ca 1-1,5 m längd och en diameter på 0,1 m för de mindre systemens missiler till 3-8 m och en diameter på 0,2-0,4 m för de mer avancerade. Burna system (s.k. "manpads") kan i allmänhet nå mål på 3-4 km höjd, medan de mer avancerade har möjlighet att ge ett volymkydd av imponerande mått med räckvidder ofta kring 30 km och några fall upp till 200 km.

Jaktmissiler bärs av flygplan och nyttjas vid luftstrid och volymtäckande luftförsvar. De brukar uppdelas i två huvudklasser efter insatsavstånd, nämligen BVR (Beyond Visual Range) resp. WVR (Within Visual Range). Gränsen mellan BVR och WVR brukar anges till ca 20 km, innebärande att missilen huvudsakligen nyttjas för insats längre resp. kortare än 20 km. Karaktäristiskt för jaktmissiler är hög hastighet (typiskt $M=3,5-4,5$) och hög förmåga till tvärsacceleration (> 60 g). BVR-missiler har ofta en räckvidd upp mot 100 km, radarmålsökare och ramjet-drift, medan WVR-missiler når ca 20 km, IR-målsökare och fastbränsle-drift. Diametern är i bägge fallen under 0,2 m och längden för WVR-missilen är ca 3 m medan en BVR-missil är ca 1 m längre.

En *kryssningsmissil* är i allmänhet relativt liten, 4-7 m lång med en diameter av 0,5-1 m och har oftast en turbojetmotor som ger missilen en något högre marschfart än ett konventionellt passagerarflygplan, vanligtvis kring $M=0,85$, dvs. ca 1 000 km/h. Missilen flyger ofta på mycket låg höjd (35-75m) över land och så lågt som enstaka meter över vattenytan (sea-scimmers). Kryssningsmissilen är utrustad med ett eller flera samverkande navigeringssystem, vilket tillsammans med en avancerad målsökare ger en mycket hög träffnoggrannhet. En kryssningsmissil kan medföra en nyttolast av 100-300 kg

sprängämnen alternativt vara försedd med en stridsdel för nukleär, biologisk eller kemisk verkan dvs. denna missiltyp kan även nyttjas som massförstörelsevapen.

Kryssningsmissiler kan transporteras och skjutas såväl i luften som på havet eller från marken. Räckvidden på 100-1 300 km är, jämfört med ballistiska missiler, något begränsad, men detta uppvägs av att en kryssningsmissiler tämligen lätt kan föras tillräckligt nära målet, t.ex. ombord på ett särskilt utrustat "civilt" lastfartyg.

Den första kryssningsmissilen var den tyska V1 som under VK2 i ett stort antal avfyrades från kontinenten mot England. En V1 som av misstag landade i Skåne under krigets slutskede kom genom dess ofrivilliga teknologiöverföring att utgöra grunden för svensk missilindustri.

Missilutvecklingen i Tyskland före och även under VK2 ledde fram till ett för sin tid stort tekniksprång i och med att den ballistiska missilen V2 blev operativ. Den tyska försvarsledningen insåg dock inte betydelsen av detta, något vi idag kan vara tacksamma för. Efter VK2 slut nyttjade de bägge segrande stormakterna V2-teknologien i sina respektive utvecklingsprogram för bäraraketer nödvändiga för att genomföra 1950- och 1960-talens rymdprogram. Kunskapen nyttjades, givetvis, även för utvecklingen av strategiska ballistiska missiler. SCUD-missilen, mest känd från konflikter i Mellanöstern, har stora likheter med V2 missilen.

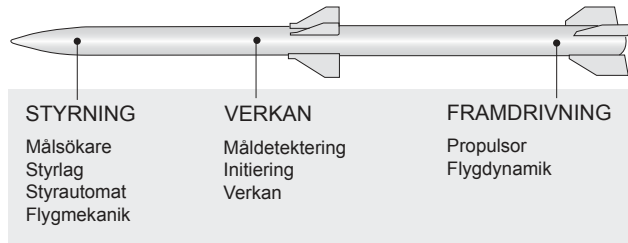
En *ballistisk* missil kännetecknas av att den behöver riktas in ytterst noggrant för avskjutning, har drivning enbart under uppskjutningen (uppnår höga hastigheter, 2-7 km/s), samt färdas i en kastbana (ballistisk bana) ovanför atmosfären. Höjden blir ca 1 200 km vid 10 000 km räckvidd. En ballistisk missil har därtill en mycket hög hastighet vid nedslaget (1-2 km/s), vilket medför stor anslagsenergi, vilket i sin tur väsentligt förstärker verkan, som i likhet med kryssningsmissilen, kan utgöras av massförstörelsevapen i form av nukleära, biologiska eller kemiska stridsdelar eller substridsdelar. En ballistisk missil kan även medföra konventionella sprängämnen. Precisionen vid nedslaget är dock väsentligt sämre än vad fallet är med kryssningsmissilerna. Man talar här ofta om något hundratal meter till skillnad från kryssningsmissilernas fåtal meter. Räckvidderna för ballistiska missiler varierar mellan 300 km och 15 000 km vilket får en tydlig inverkan på missilernas fysiska mått. Sålunda varierar längderna typiskt mellan 10 och 22 m och "kalibern" (diametern) mellan 0,9 och 2,5 m. Startvikten för en ballistisk missil är från 10 ton till drygt 100 ton.

11.2 Missilsystem

En missil består i allmänhet av tre funktionella delsystem, nämligen:

- verkan
- styrning
- framdrivning

Detta återspeglar sig även en typisk missils fysiska uppbyggnad, se *Figur 11.1*, nedan.



Figur 11.1. Systemmässig uppbyggnad av en typisk missil. (Illustration: Samuel Svärd)

I delsystemet *verkan* ingår måldetektering, initiering och verkan. Med måldetektering menas att stridsdelens sensor, zonströret, accepterat detekterat objekt utifrån förinställda villkor. Initiering medför tändning av stridsdelen och verkan innebär att stridsdelen detonerar och därigenom orsakar (avsedd) verkan. Verkanssystemen finns utförligt beskrivna i tidigare kapitel i denna volym av Lärobok i Militärteknik och till vilka avsnitt läsaren hänvisas.

Delsystemet *styrning* innefattar målsökare, styrslag, styrautomat och flygmekanik, medan till *framdrivning* räknas propulsor (motor) och flygdynamik. Dessa bägge delsystem beskrivs i den följande texten, dock först några ord om den för missilerna viktiga förmågan att kunna flyga.

Aerodynamik är ett tämligen komplicerat teknikområde och fordrar omfattande studier för att man skall få en fullgod förståelse av ämnesområdet (för vidare studier se t.ex. Anderson 2005¹⁰⁸ och Brandt et al 2004¹⁰⁹). Här skall vi endast på ett förenklat sätt försöka förklara hur den för flygförmågan nödvändiga lyftkraften uppkommer. En kompletterande framställning finns i LIM 1. Två förklaringsmodeller är vanligt förekommande, nämligen den Bernoulliska

108. Anderson, J.D., 2005: *Fundamentals of Aerodynamics*. 4th edition. McGraw-Hill Science Engineering. New York.

109. Brandt, S.A., Stiles R.J., Bertin J.J. & Whitford, R., 2004: *Introduction to aeronautics: a design perspective*. 2nd edition. AIAA education series. Reston, Va.

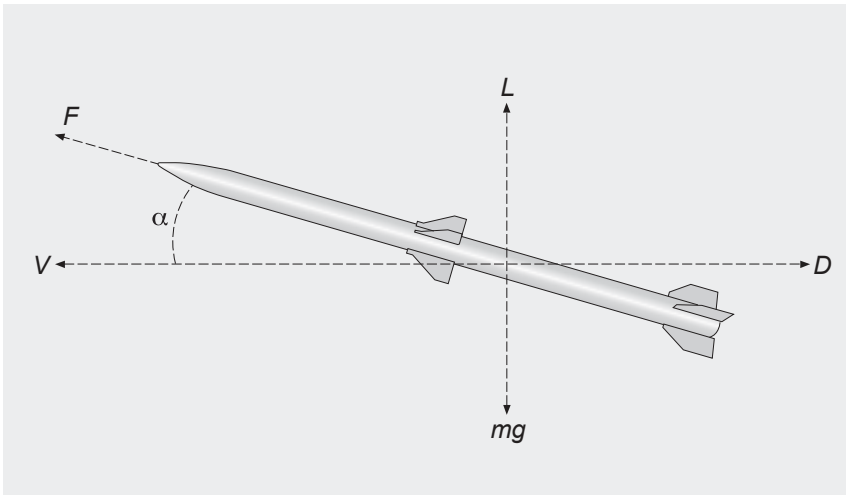
och den Newtonska. Ingen av dessa är korrekt, då de bägge utgör förenklingar av verkligheten.

Låt oss dock inledningsvis betrakta dessa förenklade förklaringsmodeller. Bernoulli betraktar en vingprofil där luftströmmen delar sig vid vingens framkant och möts vid dess bakkant. Vingen är så utformad att den del av luftströmmen som går på vingens översida har en längre väg än luftströmmen på vingens underkant. Därmed får den ”övre” luftströmmen högre hastighet. Ett undertryck skapas då på vingens översida pga. att luften där ”tunnas ut”. Trycket under vingen är då högre än ovan och en lyftande kraft bildas. Att denna förklaringsmodell inte till alla delar är korrekt inser man då man betraktar t.ex. ett jaktflygplans eller en missils vingar som ofta är helt symmetriska i profil

Den andra, senare, förklaringsmodellen bygger på Newtons 2:a och 3:e lagar. Först måste man inse att en vinge som genererar lyftkraft avlänkar flödet bakom sig nedåt. Därför accelereras (luft-) flödet nedåt och enligt Newtons andra lag uppkommer en kraft som är direkt proportionell mot accelerationen ($F=ma$). Baserat på Newtons 3:e lag om kraft och motkraft uppkommer nu en lika stor och motriktad kraft på vingen, som pressar vingen uppåt. Denna del kallas lyftkraft. I korthet kan man säga att om en vinge avlänkar en luftström med en viss kraft, uppstår en lika stor och motriktad kraft på vingen.

För en bättre förklaring måste vi betrakta luftströmningen och tryckförhållandena kring en vinge. Om man för in en vinge i en luftström kommer vingen att störa denna luftström. Studerar man detta noga finner man att allra närmast vingens yta finns ett mer eller mindre stillastående luftskikt, ett s.k. gränsskikt. Luften omedelbart ovanför gränsskiktet strävar efter att så väl som möjligt följa runt vingen i en ordnad och jämn luftström. Denna strömning benämnes laminär. Om anfallsvinkeln mot luftströmmen ökas kommer inledningsvis luftströmmen följa längs vingen och samtidigt ökar lyftkraften. Detta kan pågå upp till en viss vinkel då luftströmmen börjar släppa från vingens översida och oordnad strömning uppstår som benämnes turbulent. Ökar anfallsvinkeln ytterligare så släpper luftströmmen på vingens översida och vingen förlorar så småningom hela lyftkraften med dramatiska följder. Fenomenet kallas överstegring, vanligast är den engelska termen ”stall”. Tryckfördelningen runt en vinge är ojämn där områden med undertryck klart dominerar. Vid vingens framkant, där luftströmmen tvingas dela sig, är övertrycket som högst, medan undertrycket är som lägst på vingens översida. De olika tryckskillnaderna beror på att vingen tvingar luftströmmen att ändra hastighet och riktning jämfört med den ursprungliga, relativt ostörda luftströmmen. Efter passage av vingen har (den störda delen av) luftströmmen dels ökat i hastighet, dels länkats nedåt, vilket sammantaget genererar en lyftkraft proportionerlig mot massan av den luft som pressats, avlänkats nedåt. Vi har nu för enkelhetens skull endast talat

om en enkel vinge (egentligen en oändligt lång och rak vinge) och bortsett från vad som händer där den tar slut. Lyftkraft fås givetvis inte bara från vingen utan även från t.ex. flygplanskroppen. För missiler genereras nästan hela lyftkraften av kroppen medan de oftast mycket små vingarna huvudsakligen bidrar till stabilitet och styrning.



Figur 11.2. Kraftsystem som påverkar en missil om det råder konstanta förhållanden. Vinkeln mellan missilens symmetriaxel (eller annan referensriktning) och hastighetsvektorn kallas anfallsvinkel och betecknas vanligtvis α . (Figuren visar situationen i vertikallplanet; i horisontalplanet gäller motsvarande men med skillnaden att där verkar ingen tyngdkraft, α :s motsvarighet i horisontalplanet kallas sidanblåsningvinkel och betecknas β .) (Illustration: Samuel Svärd)

Flygmekaniskt påverkas en missil i sin flygbana av ett antal krafter (se *Figur 11.2*) (då vindstilla förhållanden antas råda) nämligen:

- Missilens *hastighetsvektor* är V
- *Motståndet*, D , verkar parallellt med hastighetsvektorn, men är motsatt riktad. Gällande D se mer under avsnitt 10.5.
- *Tyngdkraften* verkar vertikalt i tyngdpunkten och betecknas mg
- *Framdrivningskraften*, F , verkar i missilens längdriktning och alstras av missilens framdrivningssystem
- *Lyftkraften*, L , verkar vinkelrät mot motståndet (och är alltså även vinkelrät mot hastighetsvektorn V och antas här verka i vertikallplanet). L beräknas helt analogt med D som $\frac{1}{2}\rho V^2 S C_L$ (jmf. avsnitt 10.5). Lyftkraftskoefficienten, C_L , ändras också då hastigheten närmar sig $M=1$, dock inte alls lika mycket som C_D .

- *Sidkraften*, C , är lyftkraftens motsvarighet i horisontalplanet (och alltså i *Figur 11.2* riktad in i papprets plan). C beräknas helt analogt med D och L . Då missiler oftast är symmetriska är sidkraftskoefficienten $C_C = C_L$.

Anfallsvinkeln är ofta liten, någon eller några grader. Då gäller approximativt vid horisontell, rätlinjig jämviktsflygning att:

$$F \approx D$$

$$L \approx mg$$

Mer exakt, och vid större anfallsvinklar gäller:

$$F \cdot \cos\alpha = D$$

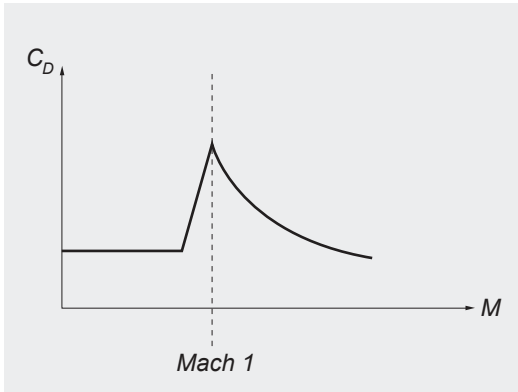
$$F \cdot \sin\alpha + L = mg$$

Lyftkraften anses oftast variera linjärt med anfallsvinkeln. Som lätt inses kan detta dock bara vara sant inom ett begränsat anfallsvinkelområde.

Då en missil (eller flygplan) gör en manöver ändras lyftkraften, L , och/eller sidkraften, C , så att en krökning av banan erhålles. Mot bakgrund av att det finns ett maximalt värde på L resp. C finns det också en gräns för hur kraftiga manövrer en missil kan göra.

Tilläggs bör också att i samband med att lyftkraften (eller/och) sidkraften ökas ökar också motståndet varför missilen tappar fart om missilen inte kan kompensera för detta ökade luftmotstånd (något som är fallet för missiler försedda med raketmotorer för framdrivning).

Vid passage av den s.k. ljudvallen vid $M=1$ uppstår flera fenomen, som t.ex. kondensringar orsakade av plötsliga och stora tryckförändringar som medför att luftfuktigheten fälls ut i form av vattendroppar. Ett mer välkänt fenomen är den s.k. ljudbangen. Dess uppkomst kan förenklat förklaras om man studerar ljudets utbredning kring en rörlig ljudkälla. Ljudutbredningen kring en statisk (stillastående) ljudkälla är omnidirektionell, dvs. ljudvågorna i form av vågfronter sprids cirkulärt kring en punktformad ljudkälla. Rör sig ljudkällan, så kommer vågfronterna att trängas ihop i rörelsens riktning och man kan då notera att ljudet framför ljudkällan får en högre frekvens än ljudkällans verkliga frekvens liksom att ljudet bakom får en lägre (s.k. Dopplereffekt). Om ljudkällan rör sig med ljudets hastighet, kommer alla ljudfronter att adderas och ge upphov till en kraftig stötvåg, en så kallad ljudbang.



Figur 11.3. Motståndskoefficientens C_D beroende av hastigheten M . (Illustration: Samuel Svärd)

Om jämvikten förändras i det aerodynamiska kraftsystemet uppstår ett vridande moment kring tyngdpunkten. Tyngdpunkten sammanfaller oftast inte med tryckcentrum, som är den punkt där de dynamiska krafterna sammantagna verkar. Ligger tryckcentrum bakom tyngdpunkten i missilens längdriktning så är missilen aerodynamiskt stabil. Är förhållandet det motsatta är den aerodynamiskt instabil och vid minsta obalans strävar lyftkrafterna att åstadkomma ett stabilt jämviktsläge genom att rotera runt kring tyngdpunkten. Ett avancerat styrsystem som kontinuerligt är verksamt kan kompensera för denna strävan och därmed möjliggöra att missilen kan flyga (cf JAS 39 Gripen).

En missils manöverförmåga brukar uttryckas som maximal uttagbar tvärsacceleration och anges i relation till tyngdaccelerationen g ($9,81 \text{ m/s}^2$). Den bestäms av vilken den maximalt uttagbara lyft- och tvärkraften är samt av vilken belastning missilens fysiska struktur tål och av styrsystemets förmåga. Missilens maximala tvärsacceleration styr likaså den minsta svängradie missilen kan ha enligt det förenklade sambandet $r = V^2/a$ där r = svängradien, V = hastigheten och a = tvärsaccelerationen.

Jaktmissiler och luftvärnsmissiler har normalt höga g -värden ($40\text{-}70 \text{ g}$), medan kryssningsmissiler ligger lägre ($12\text{-}20 \text{ g}$).

Framdrivningen måste vara så dimensionerad att missilen får ett tillräckligt fartövertag över målet så att det kan genskjutas liksom att erforderlig porté uppnås. Vidare måste framdrivningssystemet tillse att missilen accelererar tillräckligt snabbt för att kunna verka även snabbt till banfart, så att minsta porté kan minimeras, dvs. att missilen även kan verka i närområdet. En luftvärnsmissil kan typiskt verka från $0,6\text{-}1 \text{ km}$ från dess utskjutningsplats, medan en pansarvärnsmissil har en betydligt kortare minsta porté (räckvidd).

En missil har olika behov av drivkraft beroende av i vilken fas av flygbanan som missilen befinner sig. Under *accelerationsfasen* bestäms behovet främst av

missilens massa och behov av acceleration. I *banfasen* styrs drivkraftbehovet främst av luftmotståndet. Vissa missiler har även en *glidfas* under vilken ingen drivkraft behöver tillföras.

För framdrivning av missiler används nästan uteslutande reaktionsmotorer, vilka kan indelas i två huvudgrupper, nämligen *raketmotorer* och *jetmotorer*. De sistnämnda utnyttjar luftens syre, medan raketmotorerna medför eget syre.

En raketmotor utmärks således av att oxidatorn ingår i bränslet och att något syre därmed inte behöver tillföras utifrån. Det finns tre olika typer av raketmotorer:

- krutraketmotor med fast bränsle och fast oxidator (krut) (jmf avsnitt 2)
- vätskeraketmotor med flytande bränsle och dito oxidator
- hybridraketmotor med fast bränsle och flytande oxidator, eller vice versa

En *krutraketmotor* är i allmänhet mycket enkelt uppbyggd. I princip består den av ett rör med en innesluten drivladdning av krut med isolering omkring. Laddningens geometriska utformning bestämmer brännförloppet och därmed dragkraftsprofilen. Vidare finns tändanordning och en utloppsdyssa. När en krutladdning antänts sker förbränning över alla fria ytor som inte isolerats för att förhindra just detta. Förbränningen sker med en viss hastighet vinkelrätt mot de brinnande ytorna; storleken av den brinnande arean bestämmer alltså förbränningsförloppet. Av detta följer att motorns önskade drivkraftsprofil bestäms redan vid tillverkningen genom att utforma laddningen så att t.ex. ett konstant, progressivt (ökande) eller degressivt förbränningsförlopp erhålles. Krutraketmotorer är den vanligaste motortypen på små och medelstora missiler och de används även som startraketer (boosters) och som impulsmotorer för styrning eller bankorrigerig.

Vätskeraketmotorn förvarar bränsle och oxidator i separata tankar och pumpar in vätskorna i lämpliga proportioner i en brännkammare där de förbränns. Förbränningsgaserna leds ut genom en dyssa. Dragkraften hos en vätskeraketmotor kan regleras genom att förändra tillflödet av bränsle och oxidator. Till skillnad från en krutraketmotor kan den stoppas och startas om. En begränsning, särskilt vad avser större vätskeraketmotorer, är att de måste tankas i nära anslutning till start. Bränslet, men i synnerhet oxidatorn, ställer särskilda krav på hantering och förvaring. Som oxidator används t.ex. väteperoxid, salpetersyra, flytande syre och olika fluorföreningar. Bränslet kan utgöras av flytande kolväten, ammoniak, flytande väte, hydrazin eller alkohol. Vätskeraketmotorer förekommer främst i ballistiska missiler och i rymdsystem.

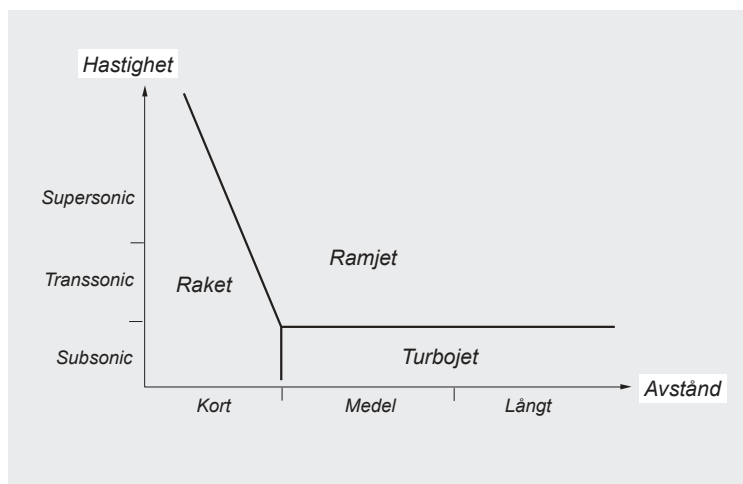
I *hybridraketmotorn* används fast bränsle och flytande oxidator (eller tvärtom). Bränslet finns då i fast form i brännkammaren dit lämpliga mängder oxi-

dator pumpas in. Man kan reglera drivkraften genom oxidatormängden samt stoppa och återstarta motorn. Dess fördel är den enklare bränslehanteringen; dock är den mekaniskt komplicerad. Den är ovanlig i missilsammanhang.

Det finns två huvudslag av jetmotorer, nämligen *turbojetmotorn* och *ramjetmotorn*. Den senare har fler undergrupper vilka dock ej behandlas här.

Turbojetmotorn bygger på att luft komprimeras i en kompressor i ett eller flera steg. Luften blandas med bränsle och förbränns i en brännkammare. Förbränningsgaserna strömmar bakåt och passerar först en turbin och sedan ut genom ett utlopp varvid en framåtriktad dragkraft uppstår. Dragkraften kan varieras i missilens bana och kan ökas t.ex. vid bankning (när missilen svänger) för att kompensera för ökat luftmotstånd (se ovan). Kryssningsmissiler är i allmänhet försedda med turbojetmotorer.

Ramjetmotorn saknar rörliga delar och består i princip av ett rör försett i framändan med ett luftintag utformat så att en stötvåguppbyggnad sker och därigenom erhålles den nödvändiga kompressionen av luften. Den komprimerade luften blandas med bränslet, oftast flytande, och förbränns i en brännkammare i "rörets" central del. Förbränningsgaserna strömmar ut genom en dysa i rörets bakre parti. För att en stötvåguppbyggnad skall kunna ske i luftintaget fordras en strömningshastighet större än $M=1$, varav följer att ramjetmotorn endast är lämpad för överljudshastigheter och för att nå dit erfordras normalt att missilen är utrustad med startraketer. Motorn är dock känslig för snedanblåsning som kan uppstå vid manövrering. Detta kan i viss mån kompenseras genom missilens styrsystem (anfallsvinkel och val av flygbana). (Önskvärt är också att motorn är reglerbar, inte så mycket för att kompensera för ökat motstånd som för att kunna kompensera för ändrat luftflöde vid manöver, så att blandningen i brännkammaren inte blir för "fet" och förbränningen släcks). Ramjetmotorn finns på långräckviddiga luftvärnsmissiler liksom på vissa moderna jakt- och kryssningsmissiler.



Figur 11.4. Reaktionsmotorers prestanda som funktion av hastighet och distans. (Illustration: Samuel Svärd)

En missils *styrmetod* bestäms bl.a. av den teknik som används för att erhålla tillräcklig styrinformation, medan missilens styrprincip styrs (sic!) av den styrslag som tillämpas.

Man skiljer mellan målrelaterad styrning resp. icke-målrelaterad styrning, den senare benämnes ofta för navigering och kan vara tröghetsnavigering, korrelationsnavigering eller satellitbaserad navigering. Navigeringsfunktionen är vanligen uppbyggd av ett eller flera navigeringssystem. Orsaken till att mer än ett system nyttjas är att alla system är behäftade med vissa osäkerheter och har yttre beroenden.

Den icke-målrelaterade styrningen behandlas endast översiktligt och förenklat nedan. För djupare kunskaper rekommenderas t.ex. Lin 1991¹¹⁰ och Kaplan & Hegarty 2006¹¹¹.

Tröghetsnavigering, som är äldst av de nämnda navigeringssätten, bygger på att man med hjälp av accelerometrar mäter acceleration i olika riktningar. Riktningarna, liksom avvikelser från dessa, bestäms noggrant av gyron. De uppmätta accelerationerna omvandlas medelst integrering först till hastighet och sedan till sträcka. En nackdel med tröghetsnavigeringssystem är att de driver med tiden och således behöver uppdateras med vissa intervall.

Korrelationsnavigering tillgår på så sätt att en i missilen lagrad bild jämförs med den bild som registreras av missilens sensor. Dvs. att man utnytt-

110. Lin, C-F 1991: *Modern Navigation Guidance and Control Processing*. Prentice Hall Series in Advanced Navigation, Guidance, and Control. ISBN-13: 978-0135962305

111. Kaplan, E. & Hegarty, C. (eds.), 2006: *Understanding GPS: principles and applications*. 2nd ed. Artech House, Norwood, MA.

jar befintligt underlag i form av en optisk bild, såsom ett fotografi eller en videoupptagning eller en bild genererad av mätdata från sensorer såsom radar, IR eller radiometri. Även geofysiska mätresultat kan nyttjas, t.ex. i form av en geomagnetisk kartbild. Ofta nyttjas topografisk information och navigeringen sker genom att missilen medelst radarhöjdmätare mäter markprofilen och korrelerar denna med en medförd terrängdatabas. I allmänhet uppnås då en hög noggrannhet. Över större vattenområden där maringeofysiskt underlag baserat på geomagnetism och gravimetri måste nyttjas är dock precisionen lägre.

Satellitnavigering ger en mycket hög positionsbestämning i tre plan (X, Y, Z) och baseras på mottagning av signaler från satelliter (GPS f.n. 31 aktiva satelliter) som går i olika banplan på ca 20 000 km höjd och som kontinuerligt skickar ut exakt tid och egen position. Missilens (GPS-)mottagare mäter den tid det tar för resp. satellits signal att nå mottagaren. Eftersom signalen går med ljusets hastighet går det att räkna ut hur långt det är till satelliten och då information om satellitens position också erhålles, kan missilen bestämma sin position i två plan, X och Y, genom triangulering mellan minst tre satelliter. För bestämning av höjden, Z, måste det finnas signaler från minst 4 satelliter.

Den målrelaterade styrningen delas upp i två grupper, nämligen styrning med separat inmätning, s.k. *kollimationsstyrning*, och *målsökarstyrning* som oftast är autonom.

Styrningen av en missil sker i samspel mellan styrautomat, styrlag och målsökare. Styrautomaten hanterar flygmekniken, dvs. sänder korrigeringssignaler till de servon/motsvarande som styr de aerodynamiska kontrollytorna (vingar, fenor, dysor), så att missilen bibehåller sin flygbana enligt signalerna från målsökaren. Missiler styrs oftast med roder, vanligen placerade som nosroder, mittroder eller stjärtroder. Placeringen ger olika egenskaper, se nedanstående tabell.

Tabell 11.1. Nackdelar och fördelar med olika roderplaceringar

| Roderplacering | Nackdelar | Fördelar |
|----------------|------------------------|---|
| Nosroder | Besvärlig rollstyrning | Styreelektroniken separerad från verkansdelen |
| Mittroder | Stora rodermoment | Snabb styrverkan |
| Stjärtroder | Långsam styrverkan | Små rodermoment |

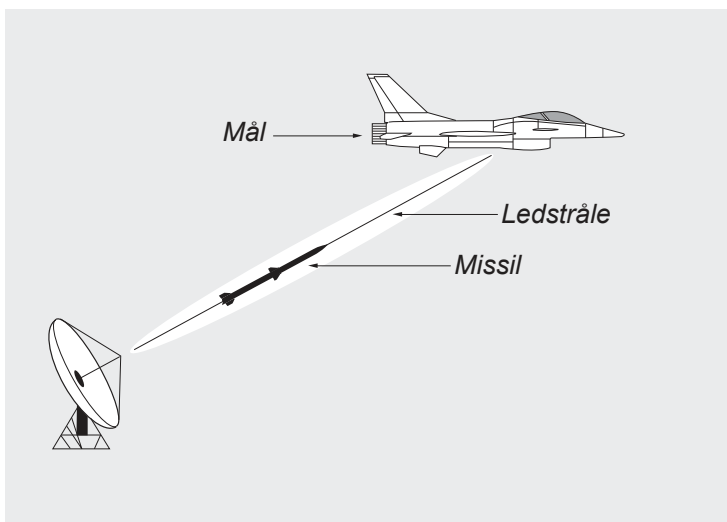
Ur militärtekniskt perspektiv skulle man kunna hävda att styrmetoden i hög grad är beroende av omgivande system och tänkt användning. Så kan det av taktiskt/operativa skäl var lämpligt med en ”fire-and-forget” missil försedd med målsökarstyrning. Där ”man-in-the-loop” är väsentlig, t.ex. för undvi-

kande av vådabeskjutning etc, så är missilen lämpligen försedd med kollimationsstyrning.

11.2.1 Kollimationsstyrning eller siktlinjestyrning

Ledstrålestyrning benämnes den styrmetod då en målföljare pekar på målet med en ledstråle och missilen har inbyggd förmåga att följa ledstrålen hela vägen till målet.

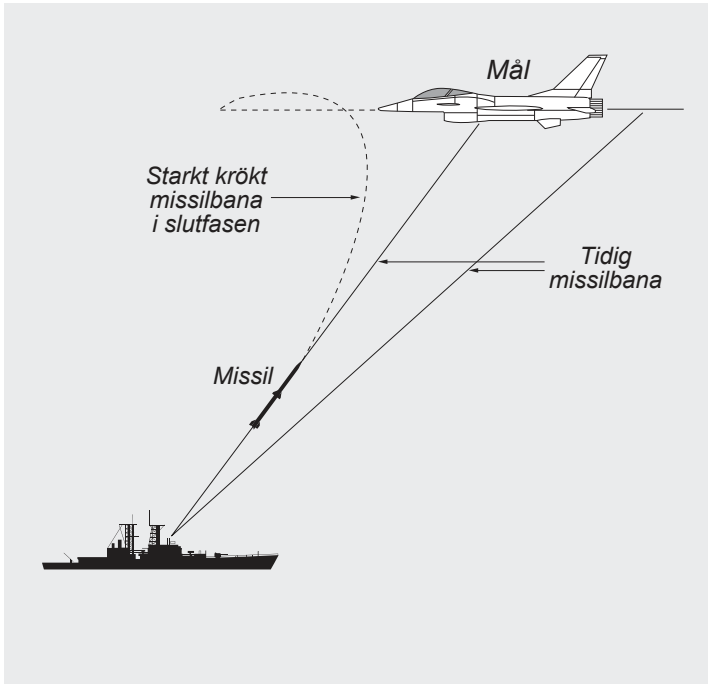
Kommandostyrning benämnes den styrmetod då en målföljare följer målet och missilen får nödvändiga korrigeringskommandon via länk från målföljaren. Kommandostyrning kan vara manuell, halvautomatisk och automatisk.



Figur 11.5. Kollimationsstyrningens princip. benämns även trepunktsstyrning – Målföljaren pekar på målet Missilen kan antingen klara detta själv, har då s.k. ledstrålestyrning, eller också, som i fallet med kommandostyrning, mottager missilen kommandon från utskjutande enhet. (Illustration: Samuel Svärd)

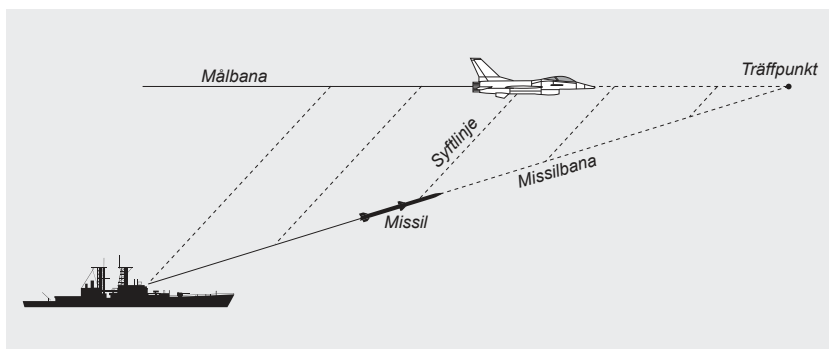
11.2.2 Målsökarstyrning

Hundkurvestyrning som styrmetod innebär att missilen hela tiden styr mot målet, vilket gör att missilbanan i närheten av målet blir skarpt krökt och endast vid långsamma eller stationära mål är detta en framgångsrik styrmetod. Fördelen är att en sådan målsökare är tekniskt enkel och relativt billig.



Figur 11.6. Målsökarstyrning. Bilden visar hundkurvestyrning där missilen ständigt är riktad mot målet, vilket medför att missilens bana blir mycket snäv i slutfasen. Detta ställer höga krav på förmåga till tvärs-accelleration; ofta högre än vad missilen har möjlighet till. (Illustration: Samuel Svärd)

Syftbäringsstyrning innebär att missilen manövrerar så syftbärningen till målet hela tiden hålls konstant. På så sätt erhålles en mycket fördelaktig ban-
kurva jämfört med hundkurvan och en mycket hög träffsannolikhet erhålles
även mot snabba och manövrerande mål. Denna metod är den vanligaste för
missiler med målsökarstyrning som styrprincip.



Figur 11.7. Målsökarstyrning. Bilden visar syftbäringsstyrning. För att kompensera för variationer av syftbäringen, genererade bl.a. av målets ändrade kurs och undanmanövrer, så måste missilen reglera sin banvinkel så att den motverkar/balanserar syftbäringsändringen. Något förenklat kan man säga att när banvinkeln tidsderivata (=missilens banvinkelhastighet) är mindre än bärings tidsderivata (=syftlinjens vinkelhastighet) så träffar missilen alltid om dess hastighet är större än målets. (Illustration: Samuel Svärd)

Målsökare är i allmänhet baserade på optronik (IR, laser, TV) eller radar-teknik och kan vara passiva, semiaktiva eller aktiva. Man skiljer även på dem som låser på målet innan avskjutning och som kallas LOBL (Lock On Before Launch) och de målsökare som erhåller mållåsning i sin bana, LOAL (Lock On After Launch). Den förstnämnda typen är den vanligast förekommande bland kortsträckviddiga jaktmissiler och pansarvärnsmissiler.

11.3 Användningsområden

Den huvudsakliga militära nyttan med en missil är att på kort tid för ett särskilt syfte leverera en stridsdel i målet eller i dess närhet. En detaljerad genomgång av stridsdelar och deras skilda verkanformer återfinns i de inledande kapitlen av denna volym av LIM.

Här skall endast nämnas att missiler inte undantagslöst nyttjas för sprängverkan i målet. Vissa missiler kan vara särskilt utrustade för underrättelsein-hämtning eller medföra störutrustning. Särskilda kommunikationssystem kan möjliggöra informationsutbyte i banan mellan missiler.

Den nyttolast som en missil kan medföra begränsas såväl av tillgängligt utrymme som fysikaliska lagar. En tumregel är att stridsdelens vikt utgör ca 1/6 av missilens. Variationerna är dock stora.

Vilken typ av missil som man bör välja styrs av målets karaktäristika, vapen-plattform, avståndskrav, manöverförmåga, nödvändig banhöjd och förvarings- och transportkrav. Fysiska dimensioner och vikt är sällan utslagsgivande, utom vad avser de mindre, soldatburna, systemen.

Tabell 11.2. Nackdelar och fördelar för olika styrmetoder

| Styrmetod | Nackdelar | Fördelar |
|--|--|--|
| <i>Kollimationsstyrning/ siktlinjestyrning</i> | | |
| Ledstrålestyrning | Hög riskexponering för skjutande enhet. Höga krav på vinkelnoggrannhet vid inmätningen. | Svårstörd, delar av styrsystemet (inmätningstrustningen) kan återanvändas. |
| Kommandostyrning | Hög riskexponering för skjutande enhet. Höga krav på inmätning och kommandolänk. | Ganska svårstörd, delar av styrsystemet (inmätningstrustningen och kommandolänken) kan återanvändas. |
| <i>Målsökarstyrning</i> | | |
| Hundkurvestyrning | Klarar endast långsamma eller stationär mål. Kan relativt enkelt hakas av vid motmedelsinsats. | Tekniskt enkel, relativt billig. |
| Syftbäringsstyrning | Dyr, tekniskt komplicerad, höga mätkrav. | Fördelaktig bankurva. Hög träffsannolikhet mot snabba och manövrerande mål. Ofta högt störskydd. |

Nyttjandet av (avancerade) missilsystem stötts i allmänhet av en taktisk simulator eller ett s.k. ”mission planning” system där tilltänkt uppdrag kan simuleras, bästa anflygningsväg fastställas och ev. underrättelseinformation beaktas. Vidare kan missilen här prepareras/programmeras för det kommande uppdraget. Systemen är utmärkta att nyttja inte enbart för speciella uppdrags-situationer, utan även för taktikutveckling.

12. Torpedteknik

Ur ett tekniskt perspektiv finns stora likheter mellan en torped och en missil. Ur operativ synvinkel finns dock fler skillnader, där tid till verkan i mål måhända utgör den främsta. En annan, tämligen uppenbar, är uppträdande i olika medier – vatten resp. luft – och därav följande delvis olika målkataloger. Man kan något förenklat säga att torpeden, jämfört med missilen, uppträder i ett besvärligare medium men har väsentligt längre tid på sig för att lösa uppgiften. Ordet *torped* kan härledas från den fruktade darrockan som med elektriska stötar får sitt byte att förlamas (cf. latinets *torpedo* som betyder förlamas, darra). Att det mer är fruktan för rockan än dess form som bidragit till benämningen står klart då man betraktar rockan som i motsats till torpeden är tämligen platt och nästan cirkulär. Den moderna torpeden, propellertorpeden, introducerades av Robert Whitehead 1875 och medförde stora taktiskt/operativa förändringar av sjöstriden (den historiskt intresserade hänvisas till Ellsén 1976¹¹² och Casali & Cattaruzza, 1990¹¹³). Nedanstående framställning är till stora delar hämtad från Ellsén 1976 och FMV 1992¹¹⁴.

Torpeder kan utgöra bestyckning på många olika typer av plattformar. På ytstridsfartyg över ca 150 brt finns oftast lätta men även tunga torpeder (se nedan). Torpeder utgör huvudvapnet på konventionella dieselelektriska ubåtar och kompletterande vapen på atomdrivna ubåtar. Torpeder på flygplan ger en snabb transportfas, men systemet blir ofta komplicerat genom behov av fällning med fallskärm. Flygplansintegrationen är därjämte kostnadsdrivande. Helikopter bestyckad med lätta torpeder nyttjas ofta för ubåtsjakt. Utöver den snabba rörligheten så är det en fördel att ha vapnet där spaningsensorerna

112. Ellsén, J. (ed.), 1976: *Svensk Torped 1876 -1976*. Förlaget Torpeden 100 år. Motala.

113. Casali, A. & Cattaruzza, M., 1990: *Sotto i mari del mondo. La Whitehead 1875-1990*. Laterza, Rom.

114. FMV, 1992: *Torpedteknik*. Kompendium, utgåva 1992. MHS. Stockholm.

finns. Nackdelen är att hkp-systemet har en lägre tillgänglighet jämfört med fartygsburna system. I vissa fall (minitorped) kan konventionella markfordon nyttjas. Ett specialfall är det då missiler utnyttjas som bärare av torped för att på så sätt vinna insatstid. Dessa system är dock inte bara tekniskt komplicerade, de är också mycket kostsamma.

Vad är då en torped? En tidig definition beskriver en torped som "... en mina som rör sig..." och en mina beskrivs som "... en stillaliggande torped..." (Wrangel, 1898)¹¹⁵. Möjligen är paradoxen inte så konstig om man beaktar att på den tiden användes ordet mina för alla typer av undervattensvapen. En något mer fullständig definition av en torped kan vara "*Ett obemannat självgående föremål som avskjuts, fälls eller simmar ut, avsett att röra sig i en bana i en större vattenmassa, styrt genom signaler utifrån eller från inbyggda egna organ*". Man kan således konstatera att det finns tre egenskaper som sammantagna särpräglar en torped, nämligen att den är *obemannad*, att den *kan färdas i vattenmassan* och att den *kan styras i sin bana*.

När det gäller indelning, kategorisering, av torpeder är denna tämligen enkel då man normalt endast skiljer mellan två huvudgrupper av torpeder, nämligen *lätta torpeder* och *tunga torpeder*. Torpeder kan, dock mindre vanligt, även indelas efter användningsområde, t.ex. ytattacktorped, allmålstorped och ubåtsjakttorped.

En *lätt torped* (eng. LWT) har en diameter av 324 mm (12 $\frac{3}{4}$ tum), en längd på ca 3 m och en vikt nära 300 kg. Fartområdet är normalt kring 25-40 knop men kan sträcka sig, dock ej för samma torped, från 10 till över 60 knop. Portén varierar med fart och tillgänglig energi mellan 5 och 30 km, vanligast är omkring 7-8 km. En fördubbling av farten medför nämligen en drygt sjufaldig ökning av energiåtgången. De lätta torpederna är oftast utrustade med en aktiv hydroakustisk målsökare och saknar kommunikationslänk (s.k. fire-and-forget torped). Då de flesta lätta torpederna är avsedda för ubåtsjakt är verkansdelen på 40-60 kg oftast av RSV-typ (se tidigare avsnitt i denna volym av LIM). De kan avfyras från tub på ytfartyg och ubåt liksom fällas från flygplan och helikopter medelst fallskärm. Lätta torpeder kan även transporteras av missiler.

Det finns dock vissa undantag från beskrivningen ovan t.ex. sådana gällande för de svenska lätta torpederna. De har en diameter av 400 mm, historiskt betingat av höga kostnader för miniatyrisering av elektronik (400 mm ger drygt 30 % större volym än 324 mm) och att Sverige ej hade (NATO) standardiserade torpedutskjutningstuber. Även torpedtuberna på ubåtar kunde fritt utformas emedan Sverige byggde sina egna ubåtar. De svenska lätta torpederna är anpassade för de besvärliga hydroakustiska förhållandena som råder i

115. Wrangel, H., 1898: *Svenska flottans bok: en populär framställning af vårt sjövapens utveckling och nuvarande ståndpunkt jämte skildringar af tjänsten och lifvet ombord: bilder från äldre och nyare tider m.m.* Seligmann. Stockholm.

Östersjön och är därför försedda med en passiv hydroakustisk målsökare, i vissa fall även med en aktiv sådan. Torpederna är utrustade med trådkommunikation för att möjliggöra styrning och mållägesuppdatering i banan, även detta huvudsakligen föranlett av de besvärliga hydroakustiska förhållandena i Östersjön. Trådförbindelsen kan upprätthållas från såväl ytfartyg, ubåt som helikopter. Fällning från helikopter sker utan fallskärm.

En *tung torped* (eng. HWT) har en diameter av 533 mm (21 tum), en längd på ca 6 m och en vikt omkring $1\,500 \pm 300$ kg. Fartområdet håller sig normalt mellan 35-50 knop men kan sträcka sig, dock ej för samma torped, från 20 till mer än 70 knop. Portén varierar med fart och tillgänglig energi mellan 15 och 75 km, vanligast är omkring 25-35 km. De tunga torpederna är oftast utrustade både med en aktiv och en passiv hydroakustisk målsökare och har dubbelriktad kommunikationsförmåga genom en trådförbindelse till avfyrande enhet. Verkansdelen är stor med 150-300 kg sprängämne och i allmänhet utformad för sfärisk tryckverkan (se vidare nedan under avsnittet verkan). Tunga torpeder avfyras från tub på ytfartyg och ubåt. I det senare fallet kan torpederna även (tyst) simma ut för att undvika att röja ubåtens läge.

Även för tunga torpeder kan vissa undantag noteras. Det gäller Ryssland, där utöver 533 mm torpeder även förekommer torpeder med 650 mm diameter, en vikt av 4,5 ton och en stridsdel på ca 700 kg. Vidare finns en rysk torped, VA-111 Shkval, som är avsedd som ett duellvapen från ubåt. Det som skiljer den från övriga är dess raketdrift och att den färdas i en superkaviterande bubbla vilket ger en sådan motståndreducering att dess fart kan uppgå till ca 200 knop. Räckvidd och manöverförmåga är dock kraftigt begränsade. Den uppges ha en porté på 7-8 km.

En torped består i allmänhet av tre funktionella delsystem, nämligen:

- verkan
- styrning
- framdrivning

Samtliga delsystem kan regleras genom interna program i torpeden, antingen i enlighet med mottagna signaler från avfyrande enhet eller internt genererade sådana.

I delsystemet *verkan* ingår måldetektering, initiering och verkan. Med måldetektering menas att stridsdelens initieringsorgan, antingen avståndskännande zonerör eller kontaktkännande anslagspets, accepterat detekterat objekt utifrån förinställda villkor. Initiering medför tändning av stridsdelen efter att de inbyggda och vådahändelseförebyggande säkringarna passerats. Verkan innebär att stridsdelen detonerar, antingen med sfärisk verkan eller med riktad sprängverkan.

Delsystemet *styrning* innefattar inre och yttre styrning, där den förra är beroende av hydrodynamiska förhållanden, medan den senare är beroende av hydroakustiska sådana.

Till delsystemet *framdrivning* räknas propulsor, motor och hydrodynamik. Låt oss först studera verkanssystemet då det ju är kring detta som torpedens övriga delsystem byggs.

12.1 Torpedens verkan

När sprängämnet i en undervattensstridsdel detonerar övergår det snabbt i gasform och utvecklar ett mycket högt tryck som sprider sig sfäriskt från detonationspunkten. Stötvågen rör sig initialt med överljudshastighet som minskar efter ett kort tidsförlopp (millisekunder) till ljudhastigheten i vatten (ca 1 500 m/s). Maximaltryckets storlek varierar proportionellt mot tredjeroten ur laddningsvikten och är omvänt proportionellt mot avståndet från detonationspunkten. Det uppkomna gasklotet utvidgar sig kraftigt vilket skapar ett undertryck inne i klotet vilket gör att det åter sammanpressas. Detta förlopp upprepas ett flertal gånger innan klotet kollapsar och bildar mindre bubblor. Under pulserandet stiger klotet mot vattenytan och avger kraftiga tryckvågor.

Ett fartyg som utsätts för verkan av en undervattensdetonation kan skadas på tre sätt.

1. Om laddningen detonerar i kontakt med fartygssidan utsätts den samma verkan som vid detonation i luft, dvs. stötvåg och splitter. Vattnet har dock en fördämmande verkan och ökar därmed laddningens effekt. Följden blir, även vid relativt små laddningar, genomslag och vatteninströmning med stora skador eller sänkning av fartyget som följd.
2. Vid ett relativt litet avstånd från fartyget kan energin i stötvåg och tryckvågor leda till genomslag av fartygsskrovet följt av vatteninströmning med stora skador som följd.
3. På längre avstånd, effektivast 10-20 m under fartygets köl, utsätts fartyget först för stötvågen, sedan för en eller flera av de sekundära tryckvågorna. Skador av flera olika typer kan då i förening med de sekundära tryckvågorna deformera hela skrovet så att det bryts av eller att det blir så deformerat att framdrivningssystemet m.fl. inte längre fungerar. Vital utrustning kan lossna från infästningar etc. Risken för sådana skador är särskilt stor om stöt- respektive tryckvågorna träffar fartyget med en frekvens i närheten av eller lika med fartygets egensvängningsfrekvens.

För torpeder finns det fem möjliga verkansformer nämligen:

Laddning på stora avstånd, kräver mycket stora laddningar, då tryckverkan avtar snabbt med avståndet. Sker detonationen t.ex. på det tredubbla avståndet från målet erfordras en laddning som är 27 gånger större än vad som annars är fallet för att uppnå samma tryck mot målet. Detta gör denna verkansform ointressant för torpeder med konventionella stridsdelar.

Laddning där gasklotet direkt får kontakt med målet är den normala verkansformen för torpeder mot ytfartyg. Förutom att gasklotet alstrar en vatten-jetstråle som ger direkt skadeverkan erhålls också stora sekundära skador genom att böjsvängningar induceras i målet, vilket kan ge funktionshinder skador och i svåra fall brott i skrovet.

Laddning i direktkontakt med målet är av intresse då torpedstridsdelen är liten och utformad så att den får direktkontakt med målet. Detonationen kan då fortplantas direkt genom målets struktur och blir därmed effektiv lokalt.

Riktad laddning i kontakt med målet är enda lösningen mot mål med stora skyddsavstånd mellan form- och tryckskrov (gäller främst ubåtar, men förekommer även på vissa moderna ytfartyg). Då laddningen måste orienteras på ett särskilt sätt mot skrovet ställer detta stora krav bl.a. på torpedens slutfasstyrning.

Whipping (ung. piskning) innebär att mekaniska egensvängningar initieras i målet och att i vissa snitt i skrovet fås de mekaniska rörelserna att förstöras, vilket i sin tur kan leda till brott. En praktisk begränsning av denna verkansform är att det erfordras mycket lågfrekventa tryckvågor för att utlösa whipping, något som i sin tur erfordrar energimängder som kan vara svåra att generera med konventionella stridsdelar.

Initieringssystemen kan indelas i två grupper, en grupp som kräver direktkontakt med målet och en grupp som är avståndsverkande. Till gruppen direktkontakt hör alla mekaniska system som hornspetsar och accelerationskontakter, dvs. anslagskontakter. Till gruppen avståndsverkande hör elektromagnetiska och hydroakustiska system.

I moderna torpeder med målsökare kan av uppenbara skäl inte hornspetsar användas, varför accelerationskontakter används i stället. Det elektromagnetiska systemet har i dessa torpeder ofta ersatts av ett hydroakustiskt system.

I hornspetsarna sker tändning genom rent mekanisk påverkan, medan tändning sker på elektrisk väg i accelerationskontakter och avståndsverkande system. Fördelen med avståndsverkande system är att de kan initiera detonation under målet. För de elektromagnetiska systemen är avståndet mellan stridsdel och mål 1-2 m mot ett avmagnetiserat mål, medan det för de hydroakustiska systemen kan vara upp till ca 20 m. Detta betyder att man i det senare fallet kan välja torpedens djupgående med hänsyn till aktuell laddningsvikt och målstorlek. De hydroakustiska systemen arbetar enligt ekolodsprincipen, dvs. zonerörret sänder ut korta, ofta kodade hydroakustiska signaler och lyssnar sedan efter ekon. Om

torpeden är avsedd mot ytmål är zoneröret riktat uppåt och vattenytan nyttjas som en avståndsreferens. Det hydroakustiska zoneröret är tekniskt mycket avancerat då det finns ett stort antal störkällor att beakta. Avseende hydroakustiska sensorer, liksom den hydroakustiska miljön, hänvisas till volym 2 resp. volym 1 av denna lärobok. Som exempel på störkällor för hydroakustiska zonerör kan nämnas:

- Turbulent strömning över svängarytan liksom kavitationsbuller från torpedens propellrar kan störa zonerörets mottagare
- Passage genom målets eller eget kölvatten kan ge upphov till transmissionsdämpningar och oönskade reflektioner
- Avsiktlig störning kan ske genom sändning av hydroakustiska signaler.
- Undervattensdetonationer ger kortvariga buller störningar inom ett brett frekvensområde
- Kraftig sjögång och sjöbrus försvårar avståndsmätning och måldetektering.

12.2 Torpedens framdrivning

Torpedens framdrivningssystem skall ge torpeden sådana prestanda att den uppfyller ställda taktiska krav avseende fart, distans, djupgående – såväl minsta som största dito – och för att undvika tidig upptäckt. Torpedfarten måste överstiga målets fart med åtminstone 50 % så att torpeden kan hinna ikapp målet. Torpedens möjliga gångdistans skall vara dimensionerad för upprepade återattacker. Djupgåendet måste medge dels fällning/utskjutning på grunda vatten, dels medge attack mot ubåt på stora djup. Vidare måste torpedens djupgående kunna regleras med hänsyn tagen till hydroakustiska förhållanden för att erhålla tystast möjliga torpedbana. Utstrålat buller från framdrivningssystemets olika komponenter måste minimeras, inte enbart pga. röjningsrisken utan även för att öka den relativa känsligheten hos målsökaren. För ett termiskt maskineri bör utsläppta avgaser ej ge upphov till detekterbart spår.

Till *framdrivning* räknas propulsor, motor och hydrodynamik, det senare är ett tämligen komplicerat teknikområde som fordrar omfattande studier för att man skall få en fullgod förståelse av ämnesområdet (för vidare studier se t.ex. Newman 1977¹¹⁶ och Sumer & Fredsö 2006¹¹⁷). Analogierna mellan aerodynamik och hydrodynamik är på det övergripande planet stora, varför läsaren hänvisas till avsnittet om aerodynamik i föregående kapitel om missilteknik.

116. Newman, J. N., 1977: *Marine hydrodynamics*. MIT Press. Cambridge. MA.

117. Sumer, B. M. & Fredsö, J., 2006: *Hydrodynamics around cylindrical structures*. World Scientific Publishing Co. Singapore.

Man brukar skilja mellan två typer av *framdrivningssystem*, nämligen *elektriska* och *termiska*.

I det elektriska framdrivningsmaskineriet används ett batteri som energikälla och en elmotor som energiomvandlare. Nyttjas en enkelroterande elmotor krävs en växellåda i de fall (de flesta) då den skall driva en propulsor med motroterande propellrar. Detta genererar utöver kostnader även ökat utstrålat buller. Det finns två huvudtyper av torpedbatterier, nämligen *primärbatterier* som ej är laddningsbara och *sekundärbatterier* som kan laddas ett begränsat antal gånger. Primärbatteriet, har, under förutsättning av att elektrolyten förvaras utanför battericellerna, en hög livslängd, men kan enbart nyttjas en gång. Sekundärbatterier, som kan användas upprepade gånger efter uppladdning, används oftast i övningstorpeder.

I ett termiskt framdrivningsmaskineri frigörs kemiskt bunden energi genom förbränning av bränsle. Den frigjorda energin omvandlas i en kolvmotor eller turbin till mekaniskt arbete och avgaserna släpps ut direkt i omgivande vatten. Om avgasernas innehåll är vattenlösligt lämnas inget spår. Om avgaserna innehåller vattenolösliga produkter stiger dessa upp till ytan och ger ett synligt spår. Detta gällde bl.a. kväve från luften när syre förbrukats i de luftdrivna torpeder som nyttjades under första hälften av 1900-talet.

Den termiska motorprocessen startar genom att drivmedel sprutas in och antänds i en gasgenerator (ångapparat) varefter gasen leds in i en turbin eller en kolvmotor, vars utgående axel oftast är kopplad till en växellåda för att erhålla ett lämpligt propellervarv och, i förekommande fall, delas upp på två motroterande axlar. *Drivmedel* kan antingen vara av typen *enkomponent* där syrebärare, bränsle och kylmedium är blandade till en vätska, t.ex. Ottofuel II., eller av typen *flerkomponent* där syrebärare (luft, väteperoxid), bränsle (alkohol, fotogen, dieselolja) och kylmedium (alkohol, vatten) är separata. Enkomponentdrivmedel är vanligt hos amerikanska och brittiska torpeder, medan flerkomponentdrivmedel förhärskar hos svenska tunga torpeder.

Tabell 12.1. Jämförelse mellan termisk resp. elektrisk framdrivning

| | Primär-batteri | Sekundär-batteri | Termiskt enkomponent-drivmedel | Termiskt, flerkomponent-drivmedel |
|-----------------------------|----------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Spårlös bana | Ja | Ja | Ofta inte | Ja |
| Djupoberoende | Ja | Ja | Ja, om slutet system | Ja, om slutet system |
| Lågt buller fr. motor | Ja | ja | Nej | Nej |
| Effekt/energitäthet | Låg | Låg | Hög | Ganska hög |
| Underhålls-kostnader | Låga | Medium | Medium | Medium |
| Kostnad för övningskjutning | Hög | Låg | Hög | Låg |

För omvandling av torpedens motoreffekt till framdrivningskraft används en propulsor. Propulsorn är normalt placerad i torpedens aktra del, där den tillsammans med stabilisator och roder bildar torpedens stjärtstycke.

Huvudkraven på torpedens propulsor är att den över ett bestämt effektområde skall kunna överföra torpedmotorns effekt till framdrivningskraft med låga effektförluster och minimerad bullergenerering.

Propulsorn kan vara utformad på tre principiellt olika sätt, nämligen med *propellrar*, *pumpjet* eller *readrift*. Den senare behandlas ej vidare här då den ej är särskild utbredd och uppgifter om prestanda tämligen osäkra. Fördelen är möjligheten att uppnå mycket höga hastigheter, men med låg verkningsgrad blir möjlig porté kort (cf. avsnittet Torpeder). Den vanligaste torpedframdrivningen är genom propellerdrift. De första torpederna var försedda med endast en propeller. För att uppnå momentbalans och eliminera krängning hos torpeden vid enpropellerdrift fordras snedställda fenor, vilka ger ökat motstånd och sänkt verkningsgrad (ca 75 %). Enpropellerdrift förekommer dock fortfarande på vissa mindre undervattensvapen med låga prestanda. Två motrotterande propellrar infördes därför för att ge motbalans i framdrivningssystemet. Motrotation kan åstadkommas med en växellåda som får de båda koncentriska propelleraxlarna att rotera åt varsitt håll. Vid elektriskt framdrivningssystem kan man låta motorns stator, kopplad till den ena propellern, rotera åt ett håll och rotorn, kopplad till den andra propellern, rotera åt det andra hållet. Med tvåpropellerdrift uppnår man en verkningsgrad på ca 90 %.

Man skiljer på två huvudtyper av stjärtstycken. I den ena huvudtypen – Fiumestjärtstycket – är rodren placerade akter om propellrarna. Fördelen är att man får god roderverkan i den starka propellerströmmen. Till nackdelarna hör en komplicerad och bulleralstrande uppbyggnad samt långa manöverledningar till rodren. I den andra huvudtypen – *Woolwich*stjärtstycket – är rodren place-

rade för om propellrarna. Fördelen ligger främst i den enklare uppbyggnaden. Bland nackdelarna återfinns en sämre roderverkan. Dessutom påverkar roderutslagen inloppsströmmen till propellrarna, vilket kan ge upphov till propellerkavitation och ökat utstrålat buller. Stjärtstycket innehåller de stabiliseringsytor, som tillsammans med rodren erfordras för torpedens styrning i sida och djup.

Ett vanligt propellerarrangemang är en s.k. pumpjet, där rotor (propeller) och stator omges med en dysa. Arrangemanget ger en bättre kontroll av strömningshastigheten över propellerbladen därmed en bättre kontroll av propulsorns kavitations-egenskaper. Dysan avskärmar buller och möjliggör en ökad belastning av propellerbladen. Diametern kan därmed göras så liten att stabiliseringsfenorna kan placeras utanpå dysan. Rodren placeras bakom dysan, där de ger torpeden hög manöverbarhet. Enkelrotation medför att växellådan kan undvaras och utstrålat buller minskas. Rotor och stator har ett turbinliknande utseende med många blad. Det förekommer även pumpjet med två motroterande propellrar inne i dysan. Då totaleffekten därvid fördelas på två propellrar kan ytterligare förbättringar av kavitationsegenskaperna uppnås.

12.3 Torpedens styrning

En torped styrs i sida och djup. Ofta kan även farten regleras. Styrningens reglersystem är alltid återkopplade, dvs. BÖR-värden jämförs med ÄR-värden och differensen behandlas med hänsyn till torpedkroppens hydrodynamiska egenskaper. Styrningen indelas i *inre banstyrning* och *yttre banstyrning*. Den inre banstyrningen som syftar till att ge farkosten rätt fart och attityd baseras på att genererade krafter styr torpeden till önskat tillstånd. Här snuddar vi ånyo på hydrodynamiken, till vars ovan angivna referenser jag får hänvisa läsaren, då ämnesområdet ligger utanför vad som behandlas i denna volym av LIM. Många torpeder är försedda med trådförbindelse till skjutande enhet.

Styrsystem med tråd hela vägen mellan skjutande fartyg och torped är principiellt mycket enkel. Den tekniska utrustningen ombord och i torpeden blir också relativt enkel. Eftersom systemet är helt ostörbart kan signalerna sändas utan komplicerande kodning och vid läglighet. Finessen med trådstyrningssystemet är i första hand att torpedernas kurs och i förekommande fall även fart kan ändras i banan. Ändringen görs från det skjutande fartyget genom att sända kommandosignaler som överföres antingen via en isolerad koppartråd (där vattnet utgör den andra ledaren), genom en koppartråd med dubbelledare eller via en fiberoptisk tråd. Torpedens och fartygets förflyttning kompenseras genom att spola av tråd från ett magasin i torpedtuben på skjutande fartyg och likaså från ett trådmagasin i torpeden. På så sätt kommer tråden att praktiskt taget ligga still i vattnet och trådbrott pga. avslitning förhindras. Dataöverföringen kan, beroende av bandbredd på förbindelsen, bestå av enkla kommandon och

bekräftelser eller generera en syntetisk bild av det målsökaren registrerar. Vid nyttjande av fiberoptisk länk kan rådata förmedlas. Hydroakustisk kommunikation mellan torpeder kan bidra till att skapa en bra ”omvärldsbild”.

För målinmätning på ytan nyttjas konventionella sensorsystem såsom radar, IR, SIS, SatInt, okulära metoder etc. medan man i vattenmassan nyttjar aktiva och passiva hydroakustiska sensorer jämte MAD (magnetic anomaly detection), den sistnämnda är dock mer lämpad för spaning än noggrann målinmätning och kompletteras ofta med sonarbojar för mer noggrann inmätning. Praktiska och operativa moment gör det naturligt att dela upp torpedskottet i fem olika faser.

1. *Stabiliseringsfasen* som inleds med utskjutning med låsta roder och inga sensorer aktiva, följs av motorstart och instyrning av torpeden till förutbestämd kurs och djup.
2. *Transportfasen* som tidsmässigt utgör den längsta och i vilken torpeden tar sig till närheten av målet är främst beroende av uppdragstypen. Mot ytmål på långa avstånd väljs torpedfart med hänsyn till bränsleekonomi och upptäcktsrisk. Även torpedens djup anpassas till detta. Mot ubåtsmål måste större hänsyn tagas till att transporttiden skall vara kort samt att mållåsning bör ske i en punkt som på bästa sätt underlättar slutfasstyrningen. Navigering sker med stöd av gyro, tryckmätare, ev. tröghetsnavigeringssystem och eventuell lägesuppdatering från skjutande enhet.
3. *Sökningsfasen* innefattar att målsökaren öppnas och påbörjar sökning. Torpeden skall under denna fas hitta ett utpekad mål och kunna diskriminera detta från falska ekon eller motmedel, kunna klassificera målet, följa målet och bilda målspar samt utgående från dessa göra en rimlighetsanalys av informationen. Vid mållåsning lämnas indata till styrsystemet. I passiv mod ges riktningar i sida och djup, i aktiv mod ges djupvinkel och målposition.
4. *Slutfasstyrningsfasen* eller Attackfasen sker styrningen på basis av egeninformation från målsökaren och ev. andra sensorer. Beroende av kvaliteten på sensorinformationen så kan en rad styrmetoder (se nedan) användas. Val av styrmetod påverkar sannolikheten för träff vilken kan vara mycket hög om rätt styrmetod väljs med hänsyn till målsökartyp och måltyp. Med passiv målsökare sker attack oftast mot målets bullercentrum (oftast vid propellarna); med aktiv målsökare sker instyrning mot läge där verkan blir som störst.

5. *Återsökningsfasen*, som uppkommer efter bom, kan ske autonomt via förinställda sökmönster eller från skjutande enhet via trådförbindelsen, vilken givetvis även öppnar för möjlighet till målväxling.

En modern torped leds i den slutliga attackfasen mot målet av en målsökare. Härigenom ökas avsevärt precisionen och därmed träffsannolikheten jämfört med äldre torpeder som sköts med s.k. rakskott, dvs. en rak bana mot en bedömd framförpunkt.

Målsökarsystemen är baserade på hydroakustiska sensorer och indelas naturligt i passiva och aktiva system. Ett passivt system bygger på principen att torpedmålsökaren omvandlar mottaget utstrålade buller från målet till elektriska signaler, vilka sedan används för detektering och styrning mot målet. Det utstrålade bullrets nivå (även dess spektrala innehåll) är beroende av målets fart, varför ett långsamt gående mål, som en ubåt, är svårt att detektera med en passiv målsökare. En aktiv målsökare sänder ut en ljudpuls som reflekteras mot målet, mottages av målsökaren och efter viss signalbehandling erhålles information om avstånd och riktning till målet samt viss information om målets storlek och fart, bl.a. genom att mäta dopplerskiftet i mottagen signal.

En aktiv målsändare ger möjlighet att under gynnsamma hydroakustiska förhållanden detektera ett stillaliggande tyst mål. Dock finns det en väsentlig nackdel förknippad med användandet av en aktiv målsökare, nämligen att den anfallande torpeden kan upptäckas av målet i sådan tid att motåtgärder kan vidtagas. Detta förhållande har lett till att aktiva målsökare idag nästan undantagslöst även har en passiv mod som kan nyttjas på avstånd så länge målet utstrålar buller på en detekterbar nivå.

Den enklaste formen av yttre banstyrning är *styrning mot framförpunkt*. Denna punkt kan modifieras under banan om målet manövrerar. En mer allmän form av styrning mot framförpunkt innebär att torpedens bana bestäms av brytpunkter, vilka av torpedens styrautomat tolkas som successiva framförpunkter. Detta kan nyttjas för långa transporter och där det finns fysiska hinder som omöjliggör kortaste bana och de fall där skjutande enhet befinner sig i ett tillbakadraget läge. Om endast bäringsinformation finns tillstädes så finns möjlighet att nyttja *siktlinjestyrring*, som innebär att torpeden under hela sin bana ligger på sammanbindningslinjen mellan skjutande enhet och mål (se vidare kollimationsstyrning i avsnittet om missiler). Vissa begränsningar finns med metoden, nämligen att datakommunikationen via trådförbindelsen kan införa tidsfördröjningar som inverkar negativt på styrningen och att vid sonarinmätningar erhålls, pga. den låga ljudhastigheten i vatten (cf. radar), en tidsfördröjning som likaså kan få en negativ inverkan på styrningen.

Vid slutfasstyrning med målsökare används framför allt två metoder med helt olika kvaliteter, nämligen *hundkurvestyrning* och *syftbäringsstyrning*. De

bägge metoderna är beskrivna i kapitlet om missilteknik (avsnitt 11.2) i denna volym av LIM, till vilket läsaren hänvisas. Principiellt skiljer ej heller de i missilkapitlet redovisade fördelarna respektive nackdelarna sig åt i torpedtillämpningen. Hundkurvestyrning är vanlig i torpeder med passiva målsökare, medan syftbäringsstyrning, som bygger på avancerad teknologi och är vida överlägsen vad avser normala och besvärliga skjutfall, nästan undantagslöst finns i torpeder utrustade med aktiva eller aktiv/passiva målsökare.

Kölvattenmålsökare (Wake homing) förekommer på vissa torpeder avsedda för ytmål. Målsökarens sensorer är känsliga för den turbulens som uppträder i ett fartygs kölvatten även en viss tid efter passage. Målsökaren identifierar kölvattnets laterala begränsningar och torpeden följer dessa i en snirklande bana fram till fartygets akterdel där detonation sker.

12.4 Användningsområden

Den huvudsakliga militära nyttan med en torped är att för ett särskilt syfte leverera en stridsdel i målet och därigenom sänka det eller få det oskadliggjort.

Viktiga egenskaper för en torped är att den har minst 50 % fartöverskott jämfört med målet, att den har inbyggd ”intelligens” och/eller dubbelriktad kommunikation med skjutande vapenplattform, att den har lågt egenbuller och är på ytan spårlos samt att den har lång räckvidd för att kunna genomföra upprepade attacker skulle undanmanövrer och motmedel förhindra träff vid första attacken.

Torpeders verkan i olika typer av mål skiljer sig avsevärt. Atomubåtar kräver speciella vapen pga. det inherenta skydd dessa har genom sin storlek, avstånd mellan form- och tryckskrov samt de konstruktionsmaterial som används. Konventionella dieselelektriska ubåtar kännetecknas av en mycket robust konstruktion mot explosioner på avstånd, men klarar som regel ej direkträff av en torped. Deplacerande fartyg är som regel känsliga även för avståndsdetonationer som kan inducera böjsvängningar (egenresonanser) i skrovet. Mindre ytfartyg får vid direkt träff oftast sådana skador att verkan blir sänkande. Mycket stora ytfartyg är svåra att direkt sänka. För dessa kan det vara mer känsligt att skada och slå ut delsystem, vilket ger en hejdande verkan (”abort mission”); t.ex. propellrar, axlar, rodermaskineri och annan vital utrustning som elförsörjning m.m. Sidokölssvävare och andra icke deplacerande fartyg ställer särskilda krav på utformningen av torpedstridsdelen som behöver bl.a. ha en stridsdel med uppåtriktad sprängverkan. Med en sådan stridsdel kan torpeden även utgöra ett hot mot lågtflygande ubåtsjaktflygplan och dito helikoptrar.

Torpeden har ett ”design-fönster” inom vilket dess konstruktion måste falla. Så t.ex. får en torped inte ha en densitet understigande vattnets, dvs. den får ej

ha flytförmåga, då den i så fall räknas som en flytande mina (cf. definitionen i avsnittet Torpeden), vilken är förbjuden enligt internationella lagar och konventioner. Elektriskt drivna torpeder är tystare än termiskt drivna torpeder, men har oftast lägre möjlig fart och kortare räckvidd. En torped utrustad med fiberoptisk kommunikationslänk kan med dess stora bandbredd även nyttjas såsom en framskjuten spaningsplattform genom att torpedmålsökaren kan nyttjas som sensor eller som komponent i en parametrisk sonar. Den nyttolast som en torped kan medföra begränsas av såväl tillgängligt utrymme som fysikaliska lagar. En tumregel är att stridsdelens vikt utgör ca 1/6 av torpedens. Variationerna är tämligen små.

Torpeder är sänkande vapen!

13. Övrig leveransteknik

13.1 Flygbomber

Flygbomber finns av en stor mängd olika typer och storlekar, allt från ostyrda till. Vikten kan variera mellan några få kilo till ca 10 000 kg. Gränserna mellan olika typer kan vara flytande. De vanligaste typerna är sprängbomb, minbomb, minsprängbomb, halvpansarbrytande bomb, pansarbrytande bomb, betongbrytande bomb, multipelbomb med splitter och/eller RSV-stridsdelar, penetrerande bomb, bomb med FAE-laddning eller motsvarande för att huvudsakligen åstadkomma högt tryck och brandbomb.

Sprängbomben är en splitterbomb, avsedd mot mjuka mål (oskyddad trupp, fordon, flygplan motsv.). Minbomben (svensk beteckning mb, vanlig utländsk beteckning MC = Medium Capacity eller GP = General Purpose) är den vanligaste bombtypen. Den kan ha en totalvikt av 50-5 000 kg, varav ca 50 % utgörs av sprängämnesmassa. *Minbomben* utnyttjas främst där man vill åstadkomma tryckverkan genom kontaktverkan. Den ger även splitterverkan, där splittrens vikt är mellan 1 och 50 g (enstaka splitter kan väga 500 g eller mer) och utkastningshastigheten är ca 1 500 m/s.

Minsprängbomben (vanlig engelsk beteckning är GP = General Purpose) är en kombination av spräng- och minbomb. Den kan ha en totalvikt av 50-1 000 kg, varav ca 30 % utgörs av sprängämnesmassa. Halvpansar-, pansar- och betongbrytande bomber (vanlig utländsk beteckning SAP = Semi-Armour Piercing och AP= Armour Piercing) har tjockare hölje än minbomben och spetsen är så utformad att inträngning är möjlig. Bomben förses med tändrör med fördröjning (bottenanslagsrör) (se avsnitt 10.2), varför detonationen inträffar efter inträngning i målet. Bombens vikt kan vara 100-5 000 kg, varav 5-30 % utgörs av sprängämnesmassa. För att bekämpa särskilt betydelsefulla mål (anläggning-

ar), kan bomber som är tyngre än 5 000 kg användas. *Multipelbomber* (ofta benämnd CBU = Cluster Bomb Units) består i princip av flygburna fällbara behållare (kapslar) från vilka ett antal stridsdelar (substridsdelar) sprids över målområdet. Behållarna kan väga ca 600 kg och kan innehålla upp till 50 stridsdelar. Multipelbomber används främst mot oskyddade eller lätt pansrade mål, t.ex. trupp, uppställda flygplan och fordonskolonner. Ett flygplan kan med en bombkapsel täcka en yta av 300x300 m med jämn splitترفördelning. När man bekämpar pansrade mål, väljer man ett mindre täckningsområde.

Penetrerande bomber kan bestå av en tvåstegsladdning med riktad sprängverkan. Totalvikten kan vara 50-350 kg, varav ca 20-50 % utgörs av sprängämnesmassa. Vid anslag utlöses den riktade sprängladdningen, omedelbart följd av granat med huvudladdning. Lättare varianter av denna bombtyp används för att förstöra start- och landningsbanor på flygbaser medan tyngre används för att penetrera ner i befästningar. Under senare tid talar man i USA om bomber som väger 30 000 lb. (\approx 15 000 kg) för att penetrera ner till djupt liggande anläggningar¹¹⁸.

13.2 Minor

Många länder inklusive Sverige har genom Ottawa-konventionen från 1997 bland annat förbundit sig att inte tillverka, inneha eller använda *truppminor*. Truppminor är, denna konvention till trots, ett fortsatt stort problem runtom i världen både i nuvarande konfliktområden och i områden där det sedan länge har varit fred. Ofta drabbas civila och ger förutom stort personligt lidande också stora samhällsekonomiska kostnader vilket ofta drabbar nya sköra statsbildningar. Svenskt militärt deltagande vid internationella operationer innebär truppörflyttningar på främmande territorium med risk att stöta på landminor, olika typer av truppminor och stridsvagnsminor.

Landminan har en lång historisk bakgrund, från enkla fällor i försvarsverk till dagens alla varianter av truppminor och stridsvagnsminor. År 52 f.Kr. lyckades Julius Caesar med sin armé med hjälp av sinnrika system av fällor med säkra passager dolda för fiender besegra en fem gånger så stor gallisk armé anförda av hövdingen Vercingetorix.

Ett annat exempel på landminans föregångare är fotangel som kan sägas bestå av fyra vassa spikar förbundna i ett centrum så att en spets alltid pekar uppåt. Den var lätt att sprida från hästryggen och kunde hindra och skada förföljare, både fotsoldater och hästar. Denna typ av ”mina” används än idag för att punktera däcken bilar, även i icke militär verksamhet.

118. Se t.ex. Aviation Week & Space technology/September 11, 2006.

Som ett tredje exempel och en föregångare till dagens minor med splitterverkan kan nämnas fougasseminan som har sitt ursprung från 1500-talets Italien. Fougasseminan bestod av en nergrävd krutladdning med sten ovanpå som verksandelar och som till en början initierades med hjälp av krutstubin.

Utvecklingen mot minor liknande dagens truppminor påbörjades redan på 1700-talet men det var först under amerikanska inbördeskriget 1861-1865 som landminor började användas i strid. Under första och framförallt andra världskriget blev truppminor en faktor att räkna med. Truppminor visade sig vara ett bra sätt att neka fienden terräng och risken för att råka trampa på en mina gav en psykologisk effekt i form av rädsla hos soldaterna. Tidigare placerades minor ut manuellt i terrängen men senare tillkom avståndsutlagda mineringar med hjälp av artilleri och flyg. Med detta förlorades kontrollen över minornas exakta position. Vissa minor har därför försetts med mekanismer för autodestruktion efter en bestämd tid men det finns stora problem med funktionssäkerheten för dessa mekanismer.

Verksansformen för truppminor är vanligtvis tryckverkan eller splitterverkan. Den till sin konstruktion enklaste typen av truppmina är tryckverkande och består ofta av mellan 50-200 g explosivämne som omges av ett tunt hölje i metall eller plast. Utlösningmekanismer för dessa bygger vanligen på tryck- eller draginitiering (trådutlöst). Splitterbildande minor har ofta större explosiv massa 0.1-1 kg och ett tjockare vanligtvis förfragmenterat hölje. Denna typ av mina är avståndswerkande. Splitterbildande minor som verkar i en bestämd riktning, s.k. Claymore-minor, är fortfarande tillåtna att användas men då endast som syftminor dvs. med manuell kontroll.

Med begreppet *stridsvagnsminor* menas här alla typer av minor som används mot militära fordon.

Då britterna i första världskriget introducerade stridsvagnen introducerade tyska armén stridsvagnsminan för att kunna möta detta nya hot. Till en början bestod minorna av nergrävda artillerigranater täckta med tryckplattor i trä för initiering men senare tillverkades minor av sprängladdningar som placerades i trälådor. Under mellankrigstiden svalnade intresset hos de allierade medan man i Tyskland fortsatte utvecklingen av minor. Det försprång som tysk militär därmed fick om minteknologi höll andra världskriget igenom. Nya mintyper, tändsystem, sätten att anlägga minfält och försåt utvecklades. Medan tyskarna stod för det mesta avseende utveckling av minor gjordes stora ansträngningar av de allierade att finna motmedel mot dessa, t.ex. utrustning för detektion, röjning och minbrytning. 1945 var de flesta mintyper som finns idag redan färdigutvecklade av i Tyskland och flera minor kopierades av andra länder de följande åren.

Den utveckling som skett efter 1945 har främst handlat om olika mins-system, utläggningmetoder, mintändare och minor med självdestruerande eller självneutraliserande funktion. De första avståndsutlagda stridsvagnsminorna

spreds med hjälp av flyg eller artilleri och medförde samma problem som för fjärrutlagda truppminor.

Stridsvagnsminor finns med såväl tryck-, splitter- som RSV-stridsdelar. Mängden explosivämne i minor med tryckverkan varierar mellan ca 1-10 kg, för riktad splitterverkan mellan ca 5-10 kg (minans totala vikt är i detta fall ofta den dubbla) och för riktad sprängverkan normalt ca 1-5 kg.

Bottenverkande minor är antingen mekaniskt initierade eller sensorinitierade. Mekanisk initiering fås genom tryck från hjul eller band eller genom att ett spröt böjs då fordonet kör på detta. Sensorinitiering innebär att en sensor detekterar fordonet. Hur effektiva minerade fält är beror till stor del på vilken yttäckning fältet har, dvs. antalet minor per ytenhet. För band eller hjulinitierade minor krävs ett större antal minor, jämfört med fullbreddsverkande minor som spröt- eller magnetiskt initierade minor, för att erhålla samma yttäckning. Minor av Claymore-typ¹¹⁹ och vissa strålbildande minor är konstruerade att verka mot fordons sidor och tak. Dessa är oftast avsedda att utlösas manuellt med dragtråd, pentylstubin eller motsvarande.

Sjöminor är normalt stationära vapen som verkar genom de stötvågs- och tryckeffekter som sprängämnet ger när det detonerar. Sjöminor började utvecklas redan under nordamerikanska frihetskriget och år 1777 konstruerade Bushnell en drivmina. 20 år senare konstruerade Fulton den första förankrade sjöminan. I Sverige finns dokumenterade försök från 1783. Första svensktillverkade sjöminan kom 1831.

Sjöminor introducerades av ryssarna under Krimkriget på 1850-talet. I början av 1900-talets användes för första gången okontrollerbara mineringar i stor skala (rysk-japanska kriget). De flesta minor är fortfarande okontrollerbara, dvs. de kan inte påverkas efter utläggningen annat än genom eventuellt inlagda program för t.ex. desarmering. Kontrollerbara minor används för inlopps- och hamnförsvar. De läggs ut i linjer över hamninloppet och är förenade med en minstation via kablar, varigenom de kan armeras och avfyra mot fientliga fartyg, alternativt säkras då eget fartyg skall passera.

Minorna kan vara av typen bottenminor eller förankrade minor. Bottenminor kan ha laddningar på upp till ett ton och beräknas ha verkan upp till 40-50 m över botten. De har fördelarna att kunna fällas från flygplan, samt är svår att röja. Förankrade minor används främst där bottendjupen är för stora för att en bottenmina ska kunna verka. Kravet på flytkraft begränsar en förankrad minas laddning till ca 300 kg. Drivminor läggs ut att driva fritt. Dessa har endast kommit till begränsad användning p.g.a. risken för de egna fartygen.

119. Fungerar i princip som en kulspränggranat med riktad kulkärve. T.ex. den amerikanska M81 Claymore minan innehåller 700 stälkuler som vardera väger 65 mg.

Minorna initieras genom kontakt- eller avståndsavfyring. Kontaktavfyring används endast för förankrade minor och innebär att minan initieras vid påsegling. En speciell kontaktmina är antennminan som ger djuptäckning mot ubåtar och introducerades under första världskriget för att hindra de tyska ubåtarna från att löpa ut ur Nordsjön. Avståndsavfyring används både vid bottenminor och förankrade minor och innebär att en sensor känner av att fartyg nalkas. Magnetminor utvecklades under mellankrigsåren och kompletterades under andra världskriget med akustik- och tryckavkännare. Genom att varje fartyg har en speciell signatur kan avfyringsorganen göras till en viss grad selektiva i fråga om målval.

13.3 Sjunkbomber och anti-ubåtsgranater

Sjunkbomber är passiva antiubåtsvapen som började användas av britterna under första världskriget. De fälls från fartyg, flygplan eller helikoptrar och kan vid anfall mot ubåt läggas i ”mattor”. Den vanligaste typen verkar liksom minor genom de stötvågs- och tryckeffekter som uppkommer då sprängämnesladdningen detonerar. Laddningen är normalt av storleksordningen ca 100 kg sprängämne. Det finns också mindre sjunkbomber eller anti-ubåtsgranater som utnyttjar RSV-verkan, dessas effekt är som regel inte sänkande utan snarare att tvinga upp ubåten till ytan. Tryckverkande sjunkbomber utlöses antingen på ett förinställt vattendjup, vid kontakt med målet eller via en akustisk eller magnetisk sensor som känner av målets läge. Verkansavståndet för normala tryckverkande sjunkbomber ligger inom ca 10 m.

13.4 Vapen för strid i bebyggelse

Eftersom strid i ort har blivit allt vanligare har det uppkommit ett behov av vapen som är bättre anpassade för sådan strid. Man har i dessa situationer behov av att kunna agera med korta reaktionstider, i trånga utrymmen, runt gathörn mm. I beskrivningen av finkalibriga vapens utveckling ovan (avsnitt 10.9) beskrivs hur detta har påverkat utvecklingen mot mer kompakta och lätthanterade vapen.

Man behöver också vapen med stridsdelar eller ammunition som penetrerar väggar och ger verkan inne i rum. Vanliga penetrerande stridsdelar klarar att penetrera de flesta väggtyper men ger liten verkan inne i rummet. Verkansdelar som antingen ger ett stort hål med mycket sekundärsplittereffekt eller stor restverkan från stridsdelen efter genomslaget är önskvärda. Helst ska stridsdelen också kunna användas mot andra förkommande mål såsom pansrade fordon. Stridsdelar som har en kombination av strål- och projektilbildande verkan samt stor tryck- och splitterverkan är då lämpliga.

Det finns i Ryssland ett stort utbud med operativa vapen som har termobarisk stridsdel (se avsnitt 4.1.7). Det mest kända är det rekylfria enmansvapnet PRO-A. Termobariska vapen utvecklas och produceras nu även i väst.

Andra speciella vapen för strid i bebyggelse är handgranater med lokal verkan, dvs. handgranater som har hög verkan där de detonerar men låg verkan någon eller några meter därifrån. Vapen av denna typ bygger på tryckverkan i stället för splitterverkan och används ofta för att säkra rum vid strid inne i byggnader.

Strid i bebyggelse medför också att man vill kunna avfira pansarvärnsvapen från slutna utrymmen, vilket är riskfyllt med rekylfria handburna vapen som utnyttjar bakblåsarprincipen. Moderna pansarvärnsvapen har därför någon form av "soft launch". Det är också önskvärt att minska vapnets signatur vid avfyrning (se avsnitt 10.3). Man vill kunna avfira från skydd och dessutom inte alltför tydligt visa för fienden var man är men också undvika skador på skytten.

14. Skydd av typmål

14.1 Trupp

Enskild stridande soldat har idag normalt ett personligt skydd i form av kroppsskyddsväst och hjälm. Det helt dominerande hotet mot trupp vid konventionell krigföring har varit splitter, varför de tidiga varianterna av kroppsskydd dimensionerats för att klara splitterhot. De förändrade uppgifterna för försvaret, särskilt internationella operationer, har lett till att även finkalibriga projektiler numera är att betrakta som ett mängdhot. Kroppsskydden som var avsedda enbart som splitterskydd kompletteras därför numera ofta med tillägsskydd mot finkalibriga projektiler.

Kroppsskyddsvästar av modern typ fick sitt genombrott under Koreakriget (1950-talet). Den skyddande effekten i dessa västar erhålls från ett antal lager ballistisk väv. De fibrer som först användes i vävarna var nylon. Under 1970-talet introducerades Kevlar och under senare år har en mängd nya fibervarianter introducerats. Denna typ av mjuka kroppsskydd förekommer militärt främst som splitterskydd och klarar den stora mängden mindre splitter. Vikten på västarna varierar beroende på vilken typ av finkalibrig projektil man väljer som hotnivå samt hur stor del av kroppen som ska skyddas.

Hjälmarna har använts långt innan skyddsvästar och tillverkades ursprungligen av stål. Numera används normalt fiberlaminat där fibrerna kan vara av samma material som i västarna, men även glasfiberlaminat används. Skyddsnyvån för sådana hjälmar är vald så att de primärt stoppar splitter men de ger även skydd mot pistolammunition och standardammunition från automatkarbiner.

Förutom kroppsskydd utnyttjas terrängen som skydd för den enskilde soldaten. Spaden är fortfarande soldatens bästa vän, och skyddsgropen fortfarande överträffad som skydds metod mot de flesta vapenhot. Trä, jord och sten är

utmärkta skyddsmaterial. I dagens rörliga krigföring ges soldaten ofta inte tillfälle att gräva ner sig, bygga upp vallar eller på annat sätt utnyttja terrängen på samma sätt som var brukligt tidigare. Ytterligare ett sätt att förbättra soldatens skydd är att i större utsträckning agera från fordon, så kallad uppsutten strid.

14.2 Transportfordon

Transportfordon för militärt bruk, t.ex. lastbilar och bandvagnar, har tidigare inte varit försedda med ballistiskt skydd men detta håller på att ändras. Särskilt för fordon verksamma i internationella operationer eftersträvas numera skydd mot splitter och finkalibrig standardammunition samt minor.

Befintliga fordon kan ges ett ballistiskt skydd med hjälp av t.ex. plåtar av pansarstål eller fiberkompositer som inlemmas i konstruktionen eller keramplattor som fästs på karossens utsida. Fordonen förses då också ofta med invändig beklädnad (liners) för att minska verkan av sekundärsplitter. Vid nyanskaffning finns betydligt bättre möjligheter att utforma ett viktseffektivt skydd redan på konstruktionstadiet. Det kan också vara lämpligt att dimensionera fordonet så att det kan bära den extravikt som ett framtida tilläggskydd kan medföra.

14.3 Lätta stridsfordon

Lätta stridsfordon är avsedda att användas i strid och har därför ett ballistiskt skydd och någon form av beväpning. Utvecklingen av skydd har gått mot allt högre skyddsnivåer. Tidigare varianter hade endast skydd mot splitter och finkalibriga standardprojektiler, medan man idag kan tänka sig att förse även de lätta stridsfordonen med tilläggskydd som klarar relativt kvalificerade pv-vapen som mellankalibriga pilprojektiler och mindre RSV-stridsdelar. En tydligt ny trend som uppkommit till följd av de ökade insatserna vid internationella operationer är att fordonen utrustas med minskydd och att grundskyddsnivån mot projektiler höjs för att också motstå mellankalibriga projektiler. Grundskyddsnivån kan variera runt fordonet men man eftersträvar nu ofta samma nivå i alla riktningar.

Skyddsnivån varierar avsevärt mellan olika fordonstyper i klassen lätta stridsfordon. Exempelvis finns i denna klass i Sverige både stridsfordon 90 och pansarbandvagn 302. Stridsfordon 90 har betydligt högre skyddsnivå än pansarbandvagn 302 och väger dubbelt så mycket, 28 ton (strf 9040C) jämfört med 14 ton (pbv 302A). Ett exempel på ett ännu lättare stridsfordon är den brittiska Scorpion (8 ton).

Det äldsta och fortfarande mest använda skydds materialet i lätta stridsfordon är stålpansar. Aluminiumlegeringar har dock också använts och lanserades så tidigt som på 1950-talet i det amerikanska M113-fordonet som har byggts i

mer än 70 000 exemplar! Detta gav ett förbättrat skydd mot splinter men hade, jämfört med normalt pansarstål, något sämre skyddsförmåga mot projektiler. Med tiden har aluminiumets skyddsförmåga mot projektiler förbättrats genom att hårdare legeringar har tagits fram. Motsvarande förbättringar sker för stål. På 1960-talet började man införa hårdare stålqualiteter och denna utveckling fortsätter kontinuerligt. Mer ovanliga och dyra material har också övervägts som skydd i stridsfordonen. Titan har diskuterats och testats sedan 1950-talet men ännu inte kommit till bred användning p.g.a. sitt höga pris. Nya lågkostnadsvarianter av titan gör dock att framtida lätta stridsfordon mycket väl kan komma att byggas av detta material. Kerampansar har införts under 1990-talet i form av tunna plattor av aluminiumoxid som fästs på grundpansaret. Från 1980-talet har man i USA arbetat med att ta fram fordonschassin där den bärande och skyddande strukturen är helt uppbyggd av fiberkomposit (glasfiber) med inslag av keramiska material. Inget sådant fordon har börjat produceras men konceptet kan eventuellt bli aktuellt för kommande generationer stridsfordon.

Grundskyddet kan också ha en geometrisk utformning som bidrar till förhöjd skyddsnivå. Oftast är förvaringsboxar, bränsletankar och bandhyllor utformade och placerade så att de utgör en viktig del av skyddet.

Tilläggskydden kan vara av varierande slag. Mer permanenta skyddsmoduler hängs utanpå fordonet för att höja skyddsnivån mot svårare varianter av grundhotet. Hit kan t.ex. räknas yttre plåtar, hålpansar och kättingar som hänger på fordonets sida samt mer avancerade kerampansarmoduler som monteras i boxar på fordon i den övre viktsklassen. Att använda tilläggskydd som med hjälp av sin geometriska utformning tippas och slår sönder projektiler, t.ex. skiktade plåtar, se avsnitt 5.1.6, infördes relativt tidigt. Exempel på fordon som använder denna teknik är 60-talsfordonen Armored Infantry Fighting Vehicle (AIFV) och Bradley. En annan liknande teknik är hålpansar, se avsnitt 5.1.6, dvs. perforerade plåtar där hålkanterna stör projektilerna, sågs på israeliska vagnar på 1980-talet.

Lätta stridsfordon förses också med dynamiska tilläggskydd som ger skydd mot RSV-stridsdelar. Exempel på denna typ av pansar är reaktivt pansar, se avsnitt 5.1.7, sensoraktiverade pansar och elektriska pansar. Alla dessa varianter har i första hand utvecklats för användning på stridsvagnar och behöver modifieras för att kunna användas på lättare fordon. Flera lätta stridsfordon har explosivt reaktivt pansar som tilläggskydd, t.ex. den israeliska varianten av M113, den spanska Pizarro och den amerikanska Bradley. Sensoraktiverade skydd, se avsnitt 5.1.7, har förevisats på såväl ryska BMP3 som amerikanska Bradley, medan elektriska pansar, se avsnitt 5.1.7, ännu bara demonstrerats som en framtida möjlighet på ett engelskt Warrior-fordon. Tilläggskydd täcker nu oftast bara en begränsad del av fordonet, men kraven på skydd i alla riktningar ökar.

I alla typer av stridsfordon har man idag också en inre liner som ska reducera sekundärsplitterverkan från RSV-strålar och projektiler som tränger igenom pansaret.

Med hjälp av i första hand geometrisk utformning har man på senare tid i större utsträckning infört skydd mot tryckverkande minor på lätta stridsfordon. Genom att införa större markfrigång och avlänkingsplåtar, flytta upp personalen från golvet, hålla all lös materiel inklusive personal på plats med fästen respektive bälten och använda energiabsorberande material i botten, kan skydd mot tryckverkande minor erhållas.

14.4 Stridsvagnar

Med stridsvagn menas ett fordon som har en grovkalibrig högtryckskanon och som har ett ballistiskt skydd som gör att den kan verka även i de tyngsta hotmiljöerna. Det klassiska skyddet för dessa har varit tjockt pansarstål som använts som kombinerat konstruktionsmaterial och enda skydd för stridsvagnar fram till 1970-talet. Den starka utvecklingen på såväl hot- som skyddssidan kan illustreras med hur tjockleken på pansaret ökat med tiden. Den första brittiska stridsvagnen, vid tiden för första världskriget, hade en pansartjocklek av storleksordningen 10 mm medan det tjockaste homogena stålpansar som infördes på motsvarande vagnar på 1960-talet var av storleksordningen 300-400 mm.

På 1960-talet blev RSV-vapnen så effektiva och allmänt förekommande att stridsvagnar inte längre kunde undgå genomslag i stålpansar av rimlig tjocklek och vikt. Detta visades tydligt i Yom Kippur-kriget 1973 där israeliska stridsvagnsförband led stora förluster till följd av massiv bekämpning från egyptiska RSV-vapen¹²⁰. Resultatet av detta blev en vändpunkt för området ballistiskt skydd för stridsvagnar. 1976 offentliggjorde engelsmännen för första gången existensen av ett pansarskydd, "Chobham Armour", som innehöll andra material än pansarstål och sades höja skyddsförmågan mot RSV-stridsdelar med en faktor tre. Skyddsförmågan mot pansarprojektiler sades dock vara mera jämförbar med pansarstål.

Även i andra västländer och i forna Sovjetunionen utvecklades nya typer av ballistiska skydd, framför allt för stridsvagns front. Dessa kunde innehålla material som fiberkompositer, keramer och nya typer av pansarstål i kombination med varandra. Det var i ryska vagnar som det först blev känt att keramer användes som skydd i stridsvagnar. De första varianterna utgjordes dock inte av fulltäta keramer utan av porösa material bestående av kulor och granulat.

120. Se t.ex. Azriel Lorber, *Misguided Weapons*, Brassey's, Inc. 2002. eller *Lärobok i Militärteknik, Vol 8*.

Förutom nya material infördes också pansarkonstruktioner som bygger på geometrisk störning, t.ex. skiktat pansar och yttre skydd. Anordningar för att få RSV-stridsdelar att detonera på för stort avstånd infördes på den brittiska stridsvagnen Centurion i form av plåtar hängande utanpå bandhyllan, så kallade kjolar. Motsvarande funktion erhöles på den svenska S-vagnen med hjälp av stänger i fronten och på ryska stridsvagnar med hjälp av kättingridåer.

Under 1980-talet togs reaktivt pansar mot RSV-stridsdelar i operativt bruk av Israel i Libanonkriget, då som tilläggskydd för israelernas äldsta stridsvagnar Centurion och M-60. Det forna Sovjetunionen införde något senare en kraftigare variant av reaktivt pansar som var verksam även mot KE-projektiler. Dessa skydd infördes på de mest moderna vagnarna T-80 och T-64B.

Sensoraktiverade skydd bedöms bli en viktig skyddskomponent på framtida vagnar. Den första varianten att sättas på en stridsvagn var det ryska Drozd-systemet som sattes på T-55A på 1980-talet och sägs ha använts i Afghanistan.

Minskydd har historiskt varit lågprioriterat då man istället använt sig av olika minröjningsmetoder som röjfordon, minplogar och vältar. På senare tid har minskydd blivit allt mer aktualiserat, särskilt för snabb anfallsstrid då man inte har tid att röja minor. För stridsvagnar är det rimligt att även eftersträva skydd mot penetrerande minor.

14.5 Flygplan och helikoptrar

Av viktsskäl har flygplan och helikoptrar som regel inte haft ballistiskt skydd. På grund av närluftvärnets kraftigt ökande betydelse förses numera attackflygplan och framför allt attackhelikoptrar med relativt kraftigt ballistiskt skydd. Detta utgörs ofta av exklusiva lätta material som titan, höghållfast aluminium, fiberkompositter och keramer, eftersom vikten i flygsammanhang är en extremt kritisk parameter. Skydden är inte heltäckande utan kan t.ex. bara gälla förarstol, botten av cockpiten och vitala komponenter. För att öka överlevnaden används också redundans för viktiga komponenter (motorer, kablage etc.).

14.6 Fartyg

I marina sammanhang kan två skyddsfilosofier urskiljas, tjockt pansarstål för att förhindra penetration alternativt speciella skrovarrangemang av typen vattentäta skott, torpedskydd och minskydd för att begränsa skadan till endast en del av fartyget.

Äldre ytstridsfartyg har varit extremt kraftigt bepansrade. Andra världskrigets slagskepp var de sista fartygen av detta slag. Som exempel kan nämnas det tyska slagskeppet Bismarck som överlevde träff av minst 8 torpeder och hundratals granater av olika kalibrar innan det till slut kunde sänkas. I takt med

att stridsflyget och robottekniken utvecklades blev det dock vid denna period orealistiskt att förlita sig på pansarskydd.

Nu infördes istället utökat antal vattentäta skott och undervattensskydd (torpedskydd) i fartygen. Dessa skydd varierade kraftigt i detaljutförande, särskilt vid jämförelse mellan olika länders konstruktioner. En gemensam nackdel med dessa koncept är stora utrymmeskrav.

Fartygens chanser till överlevnad mot vapeninsats bygger nu allt mer på principen att undgå att bli upptäckta och därmed även undgå att bli träffade. Man förlitar sig på signaturanpassning ("stealth"), snabbhet, olika typer av motmedel och specialiserade skyddsfartyg (t.ex. luftförsvars- och ubåtsjaktfartyg).

Kustnära operationer innebär att även fartygen utsätts för hot från traditionella markmålsvapen varför vissa delar av moderna ytfartyg, t.ex. stridsledningcentralen, på sistone har börjat förses med ett begränsat pansarskydd. Detta har blivit särskilt aktuellt vid deltagande i internationella operationer.

14.7 Ubåtar

Ubåtar har ett mycket kraftigt egenskydd framför allt mot tryckverkande stridsdelar i form av ett tjockt tryckskrov och ofta ett vattenfyllt mellanrum mellan ett yttre formskrov och det inre tryckskrovet. Eftersom hotet från skrovpenererande stridsdelar ökar kan ubåtarna tvingas att förses med tilläggskydd mot denna typ av hot. De skyddsåtgärder som används för markfordon bör kunna komma i fråga även här. Här har man dessutom gott om utrymme mellan skroven som kan användas för olika skyddsutformningar.

För ubåtar, såväl som för ytfartyg, gäller att stötvågor som fortplantar sig genom skrovet måste dämpas på lämpligt sätt t.ex. genom fjädrande och dämpande "upphängning" av utrusning och personal.

15. Verkansvärdering¹²¹

I föregående kapitel har ingående behandlats stridsdelar och skydd mot dessa samt den komplexa interaktionen dem emellan. Där framgår tydligt den ständigt pågående kampen mellan medel och motmedel, eller annorlunda uttryckt mellan verkan och stryktålighet.

Vapenverkan i vid bemärkelse är beroende av en stor mängd faktorer förutom vapensystemets tekniska utformning även av t.ex. förbandets sammansättning, status, miljö, telemotmedel och ledning. Motsvarande gäller för det mål man bekämpar. För studium av detta utnyttjas krigsspel och simuleringsmodeller på förbandsnivå.

Verkansvärdering i mera inskränkt bemärkelse syftar till att kvantifiera vad som händer i interaktionen mellan ett mål och ett vapen ur två aspekter:

- Vapenverkan – vapnets förmåga att slå ut eller reducera målets funktion i något avseende
- Sårbarhet – målets känslighet för olika typer av vapenverkan.

Under det kalla kriget dominerade studier av vapenverkan och resultaten från dessa utnyttjades vid utveckling av olika typer av ammunition för bekämpning av sjö-, luft och markmål. På senare tid har sårbarhetsaspekterna blivit allt viktigare och använts vid utveckling av stridsfordon, flygplan och fartyg. Resultat från verkansvärderingar är inte enbart av värde i utvecklingsarbetet utan kan även användas för att göra riskbedömningar inför en utlandsmission. Beräkningarna kan ge underlag för modifiering av plattformarnas skyddssystem

121. För grundläggande information se t.ex. *Lärobok i Militärteknik, vol. 1: Grunder*, kap. 4 och 5 och/eller *Fortifikationshandbok del 4*, kap. 11, Beräkning av träffsannolikhet. (M7747-707142).

och lämpligt taktiskt uppträdande. De kan även ge underlag till logistikbedömningar (reservdelar, ammunitionsmängder) inför en mission.

Verkansvärdering baserades ursprungligen på krigserfarenheter och försök. Denna metod har emellertid flera nackdelar. Först och främst medför den att man endast kan uttala sig om verkan av befintlig ammunition mot befintliga mål. Då verkan är starkt beroende av bl.a. beskjutningsriktning, brisadpunkt och stridsdelsfunktion krävs många skott och många mål, för att kunna uttala sig generellt om verkan av ett speciellt vapen mot ett speciellt mål. Detta är i de flesta fall varken praktiskt eller ekonomiskt möjligt. I USA har dock kongressen ställt krav på att s.k. "Live firing test" skall genomföras som en del i slutkontrollen av stryktåligheten hos exempelvis nya stridsfordon och effekten av nya stridsdelar.

Verkan är en starkt slumpmässig process och effekten varierar från skott till skott och kan därför definieras som "Sannolikheten för att vapnet förändrar målets tillstånd på ett sätt som har betydelse i den aktuella situationen". Till exempel kan en träff av en RSV-stridsdel i en stridsvagn leda till att laddautomaten slås ut. Detta i sin tur leder till att stridsvagnen förlorar sin eldgivningsförmåga vilken är av central betydelse för stridsförmågan och överlevnaden i en duellsituation.

Som stöd i verkansvärderingsarbetet används därför i dag datorprogram där interaktionen mellan stridsdel och mål beräknas i enlighet med fysikens lagar kompletterat med kunskap från försök i form av empiriska formler. Indata till dessa verkansprogram är detaljerade geometriska och fysikaliska beskrivningar av stridsdelen och målet. Man kan då relativt enkelt studera effekten av olika träffpunkter och skjutriktningar för verkan i målet av en given stridsdel.

15.1 Simuleringsmodeller

Den snabba datorutvecklingen och förbättrat teoretiskt och experimentellt underlag för interaktionen mellan stridsdel och mål har möjliggjort utveckling av datorbaserade simuleringsmodeller för verkansvärdering. Detta har pågått sedan mitten av nittonhundratalet såväl i Sverige som vid utländska forskningsinstitut.

Med datorns hjälp kan man simulera tusentals beskjutningar och variera faktorer som träffpunkter, skjutavstånd, anslagsvinklar etc. liksom stridsdelens verkansgenskaper och målets skyddsegenskaper. Resultaten från simuleringarna belyser inverkan av de olika faktorerna på målets tillstånd efter bekämpningen. Datorprogrammen ger möjlighet att beräkna de slumpmässiga variationerna i resultaten och härigenom verkanssannolikheterna.

Den stora variationen i såväl stridsdelar som mål har inneburit att ett stort antal skilda datorprogram utvecklats under åren. Vid FOA, numera FOI, ut-

vecklades datorprogrammet APAS för verkan av RSV- och KE-stridsdelar i pansrade stridsfordon. För studium av bl.a. kulspränggranater i luftmål användes ett program benämnt LMP3. För beräkning av verkan av övertattensvapen i sjömål användes VERKSAM/VERANA. Verkan av indirekt eld studerades med programmet ARTEVA. Flera av dessa program låg till grund för nya program som försvarsindustrin utvecklade för sina behov.

I utlandet har motsvarande modeller tagits fram. Visst informationsutbyte om modellbyggandet har förekommit mellan Sverige och t.ex. Holland (TNO) och USA. Indata till denna typ av modeller har dock alltid betraktats som mycket hemliga varför något nära samarbete inom området inte har förekommit. På civila marknaden har vissa modeller förekommit, men dessa har varit starkt specialiserade till något delområde och varit mycket dyra.

15.2 Verkan i markmål

En måltyp som tidigt tilldrog sig intresse för verkansvärdering var pansrade fordon. En stridsvagn har en mängd känsliga komponenter inom en mycket liten volym och skulle utan sitt ballistiska skydd vara mycket lätt att slå ut med en konventionell splitterstridsdel. Pansarskyddet ökade i takt med utvecklingen av pansarbrytande ammunition som i sin tur måste öka sin penetrationsförmåga. En stor del av pansarvärnsstridsdelens energi åtgår därför till att penetrera skyddet och denna energi måste dessutom koncentreras till en mycket liten yta för komma igenom skyddet. Detta har lett till utveckling av allt slankare pilprojektiler och RSV. Detta innebär i sin tur att den restenergi som återstår efter penetration är koncentrerad i en smal stråle.

Trots det stora antalet vitala komponenter i fordonet är det därför inte självklart att någon komponent slås ut när den smala splitterstrålen passerar genom fordonet. Det kan dock bildas sekundärsplitter från pansaret vid genomslaget som sprids inom en vidare sektor i vagnen och dessa kan skada känsliga komponenter som t.ex. kablar. De svagare av dessa sekundärsplitter försöker man fånga in genom att förse insidan med en skyddsliner i form av en kompositväv. Det är alltså inte självklart vad slutliga verkan blir.

Som ett kuriosum kan nämnas att många stridsvagnar i Irak beskötts ett flertal gånger, trots att de var funktionellt utslagna därför att de såg oskadade ut. I andra fall initierades ammunitionen och tornet flög av och verkan var uppenbar för alla och envar.

Sammanfattningsvis så kan inte dessa stokastiska och mycket komplexa förlopp beräknas för hand eller bestämmas experimentellt utan det krävs omfattande datorberäkningar för att få någorlunda trovärdiga verkanssannolikheter. I t.ex. simuleringsmodellen AVAL kan penetrationen av det ballistiska skyddet av KE-projektiler och RSV simuleras. Förutom det ballistiska grundskyddet

kan även inverkan av dynamiska skydd (ERA = Explosive Reactive Armour) och liner utvärderas.

En målbeskrivning av en stridsvagn omfattar ofta över tusen komponenter, dels de som bygger upp strukturen och skyddet och dels de som är vitala för målets funktion. Komponenterna ansluter så väl som möjligt till det aktuella målets utformning och består främst av polyedrar. För varje komponent anges dess förmåga att bromsa splitter, projektiler, RSV-strålar etc. (t.ex. tjocklek, densitet, mekaniska egenskaper). För de vitala komponenter som påverkar målets funktion måste även sannolikheten för utslagning som funktion av det aktuella splittrets egenskaper (hastighet, storlek, form, material mm.) anges. Slutligen måste man göra en funktionsanalys av målet, dvs. en beskrivning av hur målets egenskaper (eldgivningsförmåga, rörelseförmåga etc.) påverkas av de vitala komponenternas funktion.

Arbetet att ta fram en sådan målbeskrivning kan ta flera månader och kräver ingående kunskap om målets konstruktion och funktion. För att kunna ansätta värden på komponenternas bromsande förmåga och skadekriterier krävs omfattande skjutförsök. Sådana genomfördes i viss mån på sextio- och sjuttioalet vid FOA. Resultaten av dessa försök har generaliserats för olika komponenttyper och kan därför utnyttjas i likartade målbeskrivningar. Sedan en tid pågår arbete för att genom noggranna geometrisk analys och simuleringar kunna bestämma utslagskriterier för nya komponenttyper.

15.3 Verkan i luftmål

Prestanda hos stridsflygplan påverkas mycket starkt av vikten. Man strävar därför att göra konstruktionen så lätt som möjligt med hänsyn till hållfasthetskraven. Överlevnadsförmågan bygger i hög grad på fart, manövrerbarhet, god omvärldsuppfattning, telemotmedel och ”smyg/stealth”egenskaper. Man undviker om möjligt att flyga inom luftvärnets räckvidd. Stryktålighet är dock inte helt försummad. Ett sätt är att bygga in redundans i flygplanet i form av dubblerade styrsystem och viktiga kablar och gärna dubbla motorer. Dessa placeras så väl separerade som möjligt.

Vissa luftmål, som tvingas uppträda marknära och är relativt långsamma såsom, ”Close Air Support” flygplan (t.ex. A10) och attackhelikoptrar är robusta konstruktioner som skall klara finkalibrig eld. Vitala partier, främst förarplatsen och cockpit, är delvis försedda med ett ballistiskt viktseffektivt skydd såsom titan, keramer eller andra avancerade material. I övrigt bygger överlevnadsförmågan på redundanta system där så är möjligt. De redundanta systemen har i vissa fall en inbyggd logik, t.ex. i bränslesystem, som måste hanteras vid simulerade beskjutningar av målen.

De robotar och projektiler som främst används för luftmålsbekämpning har vanligen splitterstridsdelar och zornör. Stridsdelen i luftvärnsroboten RB70 och Bofors 40 och 57 mm luftvärnsammunition är förfragmenterade och innehåller en stor mängd relativt små tungmetallkuler. Dessa har ett lågt luftmotstånd och god penetrationsförmåga i förhållande till sin storlek. I vissa fall kompletteras splitterstridsdelen med en RSV-del för penetration av eventuellt pansar.

Målbeskrivningsarbetet kan vara mer omfattande än för stridsfordon. Framför allt är den inre målbeskrivningen mycket komplex med många vitala system med en hög redundans. Detta gör funktionsanalysen besvärlig och leder till ett stort felträdd som beskriver sambandet mellan de vitala komponenterna och flygplanets förmågor. En komplicerande faktor är att piloten i många fall får information om situationen via sina instrument och fattar beslut om att fortsätta eller avbryta sitt uppdrag. Genom pilotintervjuer har man försökt bestämma sannolikheten för att piloten fattar det ena eller andra beslutet. Även dessa sannolikheter har vävts in i felträdet.

Flygplanets förmåga efter bekämpning beskrivs historiskt med fem olika tillstånd:

1. Uppdraget avbryts och flygplanet förloras
2. Uppdraget avbryts och flygplanet förloras ej
3. Uppdraget fullföljs men flygplanet förloras
4. Uppdraget fullföljs och flygplanet återvänder men måste repareras
5. Uppdraget fullföljs och flygplanet återvänder och behöver ej repareras

Dessa tillstånd utgör den översta nivån i felträdet och sannolikheten för deras inträffande utgör slutprodukten av verkanssimuleringen. Man kan även få fram utslagssannolikheten för en enskild vital komponent eller vitalt system om man så önskar.

Förutom av splitterverkan kan flygplanets struktur och vitaldelar skadas av tryckverkan från en utvändig eller invändig brisad. Detta, i kombination med penetrationsskador från splitter, kan leda till nedsatt strukturell hållfasthet hos t.ex. vingar, vilket i sin tur kan tvinga piloten att avbryta uppdraget eller att flygplanet störtar. Ofta krävs en mera ingående beskrivning och avancerade beräkningsmetoder för att klarlägga omfattningen av skadorna och dessas konsekvenser.

15.4 Verkan i sjömål

Under nittonhundratalets första hälft utvecklades örlogsfartygen på ett likartat sätt som stridsvagnarna med allt kraftigare artilleri och kraftigare pansarskydd. I slutet av andra världskriget hade de största slagskeppen en huvudbeväpning med en kaliber på mer än 40 centimeter och ett pansar med en tjocklek av samma storleksordning över vitala partier. De hade en mycket tät vattentät indelning och kunde motstå tiotals träffar av tunga torpeder och pansargranater. Trots detta försvann de från havets yta på grund av flyget som angrep dem från deras svagaste sida, uppifrån, med enorma bomber.

Dagens örlogsfartyg är lättviktskonstruktioner vars överlevnad bygger på att undgå bekämpning tack vare liten signatur i alla våglängdsområden och telemotmedel för att undgå träff. Ofta har man ett flertal avancerade och reaktionssnabba luftvärnssystem för bekämpning av flyg och inkommande sjömålsrobotar. Fartygens stryktålighet bygger på en tät kraftig indelning av skrovet i sektioner så konstruerade att verkan skall begränsas till en, möjligen två sektioner. Fartygets vitala system är ofta dubblerade och placerade i olika sektioner. Kabel- och rörstammar som förbinder de vitala systemen är ofta dubblerade med omfattande omkopplingsmöjligheter.

Brand och vatteninströmning är kanske de största farorna för fartygets överlevnad. Genom användning av brandtåliga material och en vattentät och brandhärdig sektionsindelning samt väl utbyggda brandsläcknings- och länsystem försöker man begränsa dessa faror.

Det ballistiska skyddet är i begränsad omfattning på väg tillbaka. Detta beroende på att man vid internationella insatser tvingas uppträda kustnära och då kan utsättas för beskjutning av olika landbaserade vapen. Vitala partier där mycket personal uppehåller sig såsom brygga och stridsledningscentral förses därför med ett lätt ballistisk skydd mot i första hand splitter och lätt finkalibrig eld.

De ovan nämnda egenskaperna leder till att verkansvärdering av sjömål blir mycket komplex och man måste ta hänsyn till flera verkansfenomen och även skyddssystem såsom brandsläcknings- och länsystem. Dessa beräkningar kräver ofta avancerade datormodeller för exempelvis brand- och rökspridning understödda av experimentell verksamhet.

Ett hot som är unikt för fartyg är olika typer av undervattensvapen främst torpeder och minor. Verkan är avståndsberoende och kan grovt indelas i kontaktverkan, närverkan och fjärrverkan. Storleken på stridsdelarna kan variera från några tiotal kilogram explosivämne upp till laddningar på närmare ett halvt ton.

De mindre är avsedda för kontaktverkan och ingår ofta som stridsdel till lätta målsökande torpeder som detonerar i kontakt med skrovet. Vattnet fung-

erar som en effektiv fördämning och laddningen fläker upp ett hål i skrovet genom vilket spränggaserna rusar in. I vissa fall är laddningen utformad som en RSV-stridsdel för att kunna penetrera det kraftiga tryckskrovet på en ubåt. Hornminan är en annan typ av kontaktverkande vapen som kan sänka mindre fartyg och slå upp ett hål av storleksordningen 50-100 m² i större fartyg.

Torpeder mot övervattensfartyg söker sig under målet och ett zonrör utlöser stridsdelen under skrovet. Om stridsdelen är tillräckligt kraftig så slits botten upp, kölen knäcks och fartyget bryts sönder i två delar och sjunker troligen. Om detonationen sker på större avstånd så kan skrovet på grund av det pulserande klotet av spränggaser försättas i kraftiga svängningar som knäcker det och deformerar motorbäddar och propelleraxlar. Explosionen kan även förorsaka lokala deformationer av skrovet.

Den verkansform som har störst räckvidd är stötvågsverkan som kan uppträda vid minexplosioner mot alla fartygstyper eller sjunkbombsanfall mot ubåtar. Fartyget får inga synliga yttre skador men vitala komponenter kan sluta fungera, slås sönder mot fartygsstrukturen eller slitas loss från sin infästning. Därför genomför man sprängprov mot nya fartygstyper för att säkerställa att de uppfyller beställarens krav på stöttålighet.



Figur 15.1. Sprängförsök mot den holländska fregatten Evertsen 2005 i samarbete mellan FOI och holländska marinen. (Källa: FOI)

Det finns en hel flora av avancerade datorprogram för att beräkna närverkan och stötvågsverkan men sprängprov är den slutliga kvittensen på att man räknat rätt och av stor betydelse för vidareutveckling av beräkningsmetoderna.

15.5 Verkan i bebyggelse

I skuggan av andra världskriget byggdes det svenska civilförsvaret upp med syfte att skydda civilbefolkningen mot främst flyganfall. Skyddsrum, sjukvård och räddningstjänst byggdes upp för att klara krigets krav. Mycket forskning lades ned på skade- och verkansberäkningar och dimensionering av sjukvårds- och räddnings-resurser. På samma sätt som övriga verkansberäkningar innebar datorernas frammarsch en förbättrad möjlighet att simulera anfall med konventionella vapen mot en tätort.

Vid FOI har en sådan simuleringsmodell, VEBE (Verkan i Bebyggelse), utvecklats under 1980-1990-talen. Den har även ett värde i fredstid eftersom även större civila olyckor i form av spräng- och gasexplosioner kan simuleras. VEBE beskriver tryck- och splitterverkan mot byggnader (inkl. skyddsrum), människor och ledningar samt branduppkomst och brandspridning. Även byggnadsskadornas verkan på människor och skyddsrum beräknas.

Bilaga 1. Dimensionsanalys och skalning

Försök med t.ex. pansarbrytande projektiler utförs ofta i modellskala, på grund av att fullskaleförsök är mycket kostnadskrävande. Vi ska här diskutera på vad sätt slutsatser från försök i modellskala låter sig överföras till full skala. Försök med skalm modeller förekommer även inom många andra tillämpningsområden såsom experimentellt studium av statisk och dynamisk hållfasthet hos stora konstruktioner, studium av stötvågor i luft från en sprängladdning samt strömningmekaniska försök med modeller i vindtunnel.

Kännedom om skallagarna kan också hjälpa till med att bringa reda i problem där många parametrar kan varieras. Med hjälp av skallagar kan man nämligen inse att skenbart olika fall ibland är skalningar av varandra, varvid det räcker att göra försök med bara ett av dessa fall.

En detaljerad genomgång av teorin för skalning med exempel på tillämpningar från många olika områden finns bland annat redovisad i boken [1]. Här ger vi en kortfattad redogörelse för skalningsteorin samt en exemplifiering av hur denna kan tillämpas inom penetrationsmekaniken.

Dimension och skalning

När en sträcka anges till säg 11,2 meter, kallas ”talet 11,2” för mätetalet, medan ”meter” är den enhet (sort) i vilken sträckan mäts¹²². I SI-systemet arbetar man med sju grundenheter, nämligen meter (m) för längd, kilogram (kg) för massa, sekund (s) för tid, ampere (A) för elektrisk ström, kelvin (K) för temperatur, candela (cd) för ljusstyrka samt mol för substansmängd.

Övriga enheter för andra storheter kallas härledda och kan uttryckas med hjälp av grundenheterna t.ex. är enheten för hastighet m/s. De härledda enheterna kan alla uttryckas som en produkt av potenser av grundenheterna (t.ex. ms^{-1}). Man talar även om dimension för olika storheter, varmed menas, i stort sett, samma sak som enheten för ifrågavarande storhet. Riktigare torde dimensionen uttryckas med hjälp av de grundläggande storheterna i stället för enheterna. Till exempel är dimensionen för hastighet ”längd dividerad med tid”, men uttrycks ofta kortare som m/s. De flesta storheter i fysiken har dimension, men det finns även sådana som är dimensionslösa, t.ex. gäller detta antal av något.

Grunden för skalningsteorin är att alla korrekta och sunda ekvationer inom fysiken är som man säger dimensionsriktiga. Därmed menas att båda leden i en ekvation har samma dimension, och att storheter som adderas eller subtraheras från varandra också har samma dimension. Vidare ska funktioner (t.ex. loga-

122. Se även Lärobok i *Militärteknik, vol. 1: Grunder* avsnitt 7.2

ritm- och exponentialfunktioner) normalt ha dimensionslösa argument. Som ett exempel ges ett exponentiellt tidsberoende av e^{at} , där konstanten a har sorten s^{-1} . Däremot kan termen e^t , där t har dimensionen tid, inte på ett normalt sätt uppträda i en dimensionsriktig ekvation. Att kontrollera dimensionsriktigheten hos framräknade samband är ett utmärkt sätt att upptäcka felräkningar.

I rent mekaniska problem räcker det normalt att använda tre av grundenheterna, nämligen meter, kilogram och sekund. Mest för att förenkla beteckningarna ska vi hålla oss till dessa tre grundenheter. Skulle fler grundenheter komma in så generaliseras resonemanget lätt.

Varje storhet har en dimension som kan uttryckas som en produkt av potenser av grundenheterna eller storheterna längd, massa och tid, som vi betecknar L , M respektive T . Låt oss betrakta ett problem där de relevanta variablerna kallas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Antag att dimensionen för den i :te variabeln x_i är

$$[x_i] = m^{a_i} \text{ kg}^{b_i} \text{ s}^{c_i} \quad \text{eller} \quad [x_i] = L^{a_i} M^{b_i} T^{c_i} \quad \text{A1)}$$

Vi gör följande skalning: Multiplicera mätetalen för alla längder i problemet med faktorn k_L , alla massor med k_M och alla tider k_T . Multiplicera vidare (mätetalet) x_i med följande faktor

$$k_L^{a_i} k_M^{b_i} k_T^{c_i} \quad (\text{skalfaktor för } x_i) \quad \text{A2)}$$

En stunds eftertanke ger vid handen att variablerna även efter det att de multiplicerats med respektive faktor satisfierar alla ekvationer som de satisfierade tidigare. Det beror just på att ekvationerna är dimensionsriktiga, och på att faktorerna som vi skalar med hänger ihop med dimensionen på angivet sätt. Man säger att det nya tillståndet (efter skalningen) och det gamla är similära tillstånd.

I ett problemområde där ekvationerna är kända, kan dessa användas för att härleda reglerna för skalning. Kraftfullheten i dimensionsresonemanget ligger i att reglerna för skalning kan härledas utan att man behöver känna till de ekvationer som styr problemet. Det räcker med att ha en lista med de relevanta variablerna i problemet och sedan utgå från deras respektive dimension.

Skalning med samma material i modell- och fullskala

Som en första tillämpning på skalning med faktorerna (A2) ska vi undersöka vilka skalningar som är möjliga om modellen och den verkliga förebilden ska vara tillverkade av samma material (kallas ”replica scaling” på engelska). Först

måste vi göra klart för oss vilka materialegenskaper som är relevanta för det aktuella problemet, och sedan kräva, att skalningen är sådan att dessa materialparametrar skalas 1:1. I våra problem är givetvis hållfasthetsegenskaperna intressanta, men även densiteten är av betydelse i dynamiska förlopp, eftersom tröghetskrafterna spelar roll.

Tabell A1. Dimension och skalfaktor för några intressanta materialparametrar

| Storhet | Enhet | Dimension | Skalfaktor |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|
| Densitet | kg/m ³ | $L^{-3}M$ | $k_L^{-3} k_M$ |
| Elasticitetsmodul | kg/(ms ²) | $L^{-1}MT^{-2}$ | $k_L^{-1} k_M k_T^{-2}$ |
| Poissons konstant | – | – | 1 |
| Flytspänning | kg/(ms ²) | $L^{-1}MT^{-2}$ | $k_L^{-1} k_M k_T^{-2}$ |

Låt oss säga att de intressanta materialparametrarna är de som är listade i tabell A1. Där ges även deras dimensioner samt respektive skalfaktorer. Sorten för elasticitetsmodulen och flytgränsen är Pa (pascal) och Poissons tal (tvärkontraktionstalet) är dimensionslöst. Pascal, som är enheten för tryck, är N/m², och N = kgm/s², vilket framgår av Newtons kraftekvation ($F = ma$). Alltså är Pa = kg/(ms²).

Villkoret att materialparametrarna skall skalas 1:1 kan matematiskt uttryckas så att skalfaktorerna i sista kolumnen i tabell A1 alla skall vara lika med 1. Eftersom elasticitetsmodulen och flytspänningen har samma skalfaktor och Poissons tal är dimensionslöst får vi endast följande två ekvationer

$$k_L^{-3} k_M = 1 \quad (\text{A3})$$

$$k_L^{-1} k_M k_T^{-2} = 1 \quad (\text{A4})$$

för tre obekanta. Vi kan därför förvänta oss en en-parametrig lösningsskara. Vi försöker uttrycka k_M och k_T i k_L . Ur ekvation (A3) löser vi först ut k_M och sätter sedan in resultatet i ekvation (A4) och löser ut k_T ur denna. Vi erhåller

$$k_M = k_L^3 \quad (\text{A5})$$

$$k_T = k_L \quad (\text{A6})$$

som innebär att massan skalas som längdskalan i kubik samt att tidsskalan är samma som längdskalan.

Ur uttrycken (A5-A6) på skalfaktorerna för de grundläggande storheterna kan skalfaktorerna för alla andra storheter beräknas, se tabell A2. Denna skalning är den som normalt används för försök med stridsdelar och slutballistik. Den lämnar de flesta viktiga materialparametrarna invarianta. Däremot kommer töjningshastigheten som framgår av tabellen att få ett högre värde i modellen än i verkligheten, om modellen är mindre än sin förebild (nedskalning). Många material uppför sig olika beroende på töjningshastigheten och kommer då inte att skalas riktigt. Denna avvikelse från skallagarna, som beror på töjningshastighetsberoende materialmodeller, studeras i referens [2] med hjälp av kontinuummekaniska simuleringar. En bred genomgång av möjligheter och svårigheter vid skalning av slutballistiska fenomen ges i [3].

Tabell A2. Vanlig skalning av slutballistiska fenomen

| Storhet | Beteckning | Skalfaktor |
|-------------------|-------------------|------------|
| Längd | L | k |
| Massa | M | k^3 |
| Tid | T | k |
| Densitet | ρ | 1 |
| Hastighet | v | 1 |
| Tryck | p | 1 |
| Spänning | σ | 1 |
| Töjning | ε | 1 |
| Acceleration | a | k^{-1} |
| Töjningshastighet | $d\varepsilon/dt$ | k^{-1} |

Accelerationer kommer att bli högre i modellen vid nedskalning. Tyngdaccelerationen, som här på jorden kan betraktas som en konstant, skulle också behöva vara olika i modellen och verkligheten. Eftersom detta inte går att åstadkomma på något enkelt sätt, blir slutsatsen, att fenomenen i vilka tyngdaccelerationen spelar roll inte kan skalas enligt metoden i tabell A2. Ett exempel på ett sådant fenomen är gasbubblors dynamiska uppträdande i vatten.

Dimensionslösa variabler

Besläktad med skalning är tekniken med att övergå till dimensionslösa variabler, så kallade pi-termer. Ofta använder man sådana för att karakterisera en viss fysikalisk situation. Exempel på en sådan dimensionslös variabel är längdkaliberförhållandet, L/d , för en projektil. Penetrationen för en projektil kan normeras med avseende på projektillängden eller diametern, varvid de dimensionslösa variablerna P/L respektive P/d uppstår. Från strömningsmekaniken är Reynolds' tal ett annat välkänt exempel.

Låt oss, precis som tidigare, betrakta ett inte närmare specificerat fysikaliskt problem i vilket de relevanta variablerna är x_1, x_2, \dots, x_n . Här inräknas alla storheter som behövs för att beskriva situationen, alltså även sådana som normalt benämnes konstanter, t.ex. materialkonstanter. En pi-term är en produkt av formen

$$\pi = x_1^{q_1} x_2^{q_2} \cdots x_n^{q_n} \quad (\text{A7})$$

där exponenterna q_i är sådana att π är dimensionslöst. Exponenterna kan vara både positiva, negativa och noll, och de behöver inte vara heltal. Om en exponent är noll, betyder det att motsvarande x -variabel inte ingår i pi-termen, eftersom x upphöjt till noll är lika med 1.

Problemet att bestämma pi-termerna leder till ett ofta underbestämt linjärt ekvationssystem för exponenterna q_i . Pi-termerna är sålunda inte entydigt bestämda utan det finns oändligt många. Däremot kan man bestämma en fullständig uppsättning av oberoende pi-termer. Att uppsättningen är fullständig betyder att alla pi-termer ska kunna skrivas som en produkt av potenser av pi-termerna i uppsättningen. En uppsättning pi-termer sägs vara oberoende om ingen av dem kan skrivas som en produkt av potenser av de övriga pi-termerna i uppsättningen. Vi ska nedan demonstrera en metod för att bestämma en fullständig och oberoende uppsättning av pi-termer.

Buckinghamns pi-teorem

Nyttan av pi-termerna framgår av Buckinghamns pi-teorem vars innebörd är att alla fysikaliska samband mellan x -variablerna alltid ska ha en sådan form att de går att uttrycka såsom ett samband mellan pi-termerna, säg

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad (\text{A8})$$

Detta krav på fysikens ekvationer är måhända ett bättre sätt att uttrycka kravet på att ekvationerna ska vara dimensionsriktiga. Vidare kan similaritet

definieras med hjälp av pi-termerna. Man säger att två tillstånd (uppsättningar värden på x -variablerna) är *similära* om pi-termerna svarande mot de två tillstånden är lika. Den definitionen är ekvivalent med den vi gett tidigare.

Bestämning av pi-termerna i ett exempel

Vi ska visa hur en fullständig och oberoende uppsättning av pi-termer kan bestämmas i anslutning till ett exempel. Betrakta problemet att bestämma en pilprojektils penetration i en tjock homogen plåt. Vi ska inte lösa problemet utan nöja oss med att visa hur man med dimensionsanalys kan komma fram till ekvation (A15) nedan, som anger "formen" för hur penetrationen beror av givna storheter. För att genomföra detta behöver vi inte någon konkret formulerad penetrationsmodell. Däremot måste vi ha så mycket känsla för problemet att vi kan ställa upp listan i tabell A3 på de variabler som penetrationen beror av. Först har vi geometriska variabler, såsom projektilens längd L och dess diameter d . Vi antar att dessa två variabler räcker för att beskriva den relevanta projektilgeometrin. Penetrationen beror vidare på anslagshastigheten v och på materialen i projektil och mål. Vi antar för enkelhets skull att de relevanta materialparametrarna inskränker sig till densitet och något mått på materialets hållfasthet, som t.ex. flytspänningen. För dimensionsanalysen är det inte nödvändigt att ta ställning till vilket mått på hållfastheten det är fråga om, utan det räcker att dimensionen är känd.

Tabell A3. För penetrationsproblemet relevanta variabler och deras dimension

| Storhet | | Beteckning | Enhet | Dimension |
|------------|-----------------------------|------------|-------------------|-------------------|
| P | penetration | x_1 | m | L |
| L | projektillängd | x_2 | m | L |
| d | projektildiameter | x_3 | m | L |
| v | anslagshastighet | x_4 | m/s | $L T^{-1}$ |
| ρ_p | densitet för projektilen | x_5 | kg/m ³ | $L^{-3} M$ |
| ρ_t | densitet för målet | x_6 | kg/m ³ | $L^{-3} M$ |
| σ_p | hållfasthet för projektilen | x_7 | Pa | $L^{-1} M T^{-2}$ |
| σ_t | hållfasthet för målet | x_8 | Pa | $L^{-1} M T^{-2}$ |

Vi startar bestämningen av pi-termerna med att ånyo lista de relevanta variablerna och deras dimensioner på följande sätt:

| | P | L | d | v | ρ_p | ρ_t | σ_p | σ_t |
|-----|-----|-----|-----|-----|----------|----------|------------|------------|
| L | 1 | 1 | 1 | 1 | -3 | -3 | -1 | -1 |
| M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -2 | -2 |

Variablerna står överst som rubriker på respektive kolumn. Till vänster står beteckningar för tre grundläggande storheter längd (L), massa (M) och tid (T). Talen inuti rektangeln är exponenterna på L , M och T i respektive variablers dimension.

Pi-termerna bestäms genom att på schemat göra successiva operationer, som liknar dem som utförs när linjära ekvationssystem löses med Gauss-elimination. Den grundläggande operationen är, att till en kolumn lägga en multipel av en annan kolumn, och samtidigt uppdatera kolumnrubrikerna, så att deras dimension ges av kolumnen under. Vidare är det tillåtet att multiplicera en kolumn med ett tal som är skilt från noll, om man samtidigt upphöjer kolumnrubriken med samma tal. Det är också tillåtet att permutera rader och kolumner under förutsättning av att respektive rubriker flyttas med. Målet är att, om möjligt, transformera matrisen, så att den blir

| | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Då är nämligen rubrikerna över de kolumner som består av bara nollor dimensionslösa, och dessa rubriker är just de sökta pi-termerna. Skillnaden mellan antalet ursprungliga variabler och antalet pi-termer är tre, vilket sammanhänger med att grunddimensionerna i detta fall, L , M och T , är tre till antalet.

Rubrikerna för de tre kolumnerna längst till vänster har dimensionerna längd, massa och tid och kan sägas utgöra en karakteristisk längd, en karakteristisk massa och en karakteristisk tid för systemet. Det kan inträffa, i andra exempel, att man inte kan få fram dessa kolumner, som svarar mot grundenheterna. I så fall beror det på att kolumnerna i det ursprungliga schemat, betraktade som vektorer, är beroende på ett sådant sätt att de inte spänner upp hela rummet. I det fallet får man nöja sig med färre linjärt oberoende kolumnvektorer än antalet grundenheter i analysen, och då blir skillnaden mellan antalet ursprungliga variabler och antalet pi-termer mindre än antalet grundenheter i analysen.

Vi återvänder till förenklingen av matrisen. Vi vill få nollor i alla positioner utom en i första raden. Det åstadkommer vi genom att lägga olika multipler av tredje kolumnen till de övriga. Till första kolumnen lägges minus ett gånger den tredje, eller enklare uttryckt från den första kolumnen drages den tredje, och vi får

| | P/d | L | d | v | ρ_p | ρ_t | σ_p | σ_t |
|----------|-------|-----|-----|-----|----------|----------|------------|------------|
| L | 0 | 1 | 1 | 1 | -3 | -3 | -1 | -1 |
| M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -2 | -2 |

Den tredje kolumnen dras sedan från den andra och fjärde kolumnen. Vidare läggs den tredje kolumnen till de två sista, och slutligen lägges tre gånger den tredje kolumnen till femte och sjätte kolumnerna. Efter dessa operationer fås

| | P/d | L/d | d | v/d | $\rho_p d^3$ | $\rho_t d^3$ | $\sigma_p d$ | $\sigma_t d$ |
|----------|-------|-------|-----|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| L | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -2 | -2 |

Sedan lägger vi lämpliga multipler av femte kolumnen till övriga, för att i dessa kolumner få nollor i andra raden. Matrisen får då följande utseende:

| | P/d | L/d | d | v/d | $\rho_p d^3$ | ρ_t / ρ_p | $\sigma_p / (\rho_p d^2)$ | $\sigma_t / (\rho_p d^2)$ |
|----------|-------|-------|-----|-------|--------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| L | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Att vi valde femte kolumnen är en smaksak. Det viktiga var bara att välja en kolumn som har värde skilt från noll i sin andra rad och en nolla i sin första rad, så att nollorna i första raden inte förstörs.

Nollor i sista raden (utom på ett ställe) fås genom att lägga lämpliga multipler av fjärde kolumnen till övriga. Vi får

| | | | | | | | | |
|----------|---|---|---|----|---|---|----|----|
| M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| T | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -2 | -2 |

Därmed är målet i princip nått. Det återstår endast triviala transformationer såsom att multiplicera fjärde kolumnen med -1 samt att permutera kolum-

nera. Om fjärde kolumnen multipliceras med -1 , så ska dess rubrik inverteras, så att den blir d/v .

En fullständig uppsättning pi-termer står nu såsom kolumnrubriker till de kolumner som bara består av nollor, dvs. kolumn nummer 1, 2, 6, 7 och 8. Uppsättningen pi-termer är som tidigare påpekats inte entydigt bestämd. Vi kan, om vi så vill, fortsätta och göra flera operationer på pi-termskolumnerna, för att få pi-termer med naturligare tolkningar.

I sista pi-termen ingår såväl materialegenskaper hos projektilen som målet, medan det inte är fallet i den näst sista. Sjätte kolumnen dras därför från den sista. Då kommer den sista pi-termen att divideras med pi-termen i sjätte kolumnen, varvid den blir $\sigma_t/\rho_t v^2$.

För en slank eroderande pilprojektil vet vi, att det är naturligare att normera penetrationen P med avseende på projektillängden L än på kalibern. Därför drar vi andra kolumnen från den första, varvid rubriken i första kolumnen kommer att divideras med rubriken i den andra. Efter dessa operationer blir matrisen

| | P/d | L/d | d | v/d | $\rho_p d^3$ | ρ_t / ρ_p | $\sigma_p / (\rho_p v^2)$ | $\sigma_t / (\rho_p v^2)$ |
|----------|-------|-------|-----|-------|--------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| L | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| T | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

och en uppsättning pi-termer hörande till vårt problem är således

$$\pi_1 = P/L \quad (\text{A9})$$

$$\pi_2 = L/d \quad (\text{A10})$$

$$\pi_3 = \rho_t / \rho_p \quad (\text{A11})$$

$$\pi_4 = \sigma_p / (\rho_p v^2) \quad (\text{A12})$$

$$\pi_5 = \sigma_t / (\rho_t v^2) \quad (\text{A13})$$

Tillämpning av Buckingham's pi-teorem

Enligt Buckingham's pi-teorem måste fysikaliska samband kunna uttryckas med ekvationer som bara innehåller pi-termerna, dvs. sambanden måste se ut som ekvation (A8). Vi antar att första pi-termen går att lösa ut och skriver därför sambandet

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (\text{A14})$$

där f är en inte närmare specificerad funktion. Insättning av uttrycken (A9-A13) på pi-termerna ger

$$\frac{P}{L} = f\left(\frac{L}{d}, \frac{\rho_t}{\rho_p}, \frac{\sigma_p}{\rho_p v^2}, \frac{\sigma_t}{\rho_t v^2}\right) \quad (\text{A15})$$

Ekvation (A15), som uttrycker sambandet mellan penetrationen P och det givna storheterna, är ingen färdig formel eftersom funktionen f inte är känd, men den kan ändå vara användbar.

Fallet som behandlas i Tates penetrationsmodell är ett specialfall av vårt fall. Tates modell använder nämligen samma variabler som listades i tabell A3 förutom projektdiametern d , varför pi-termen L/d bortfaller. Ekvation (A15) modifieras i det fallet till

$$\frac{P}{L} = f\left(\frac{\rho_t}{\rho_p}, \frac{\sigma_p}{\rho_p v^2}, \frac{\sigma_t}{\rho_t v^2}\right) \quad (\text{A16})$$

Om både projektil och mål saknar hållfasthet, dvs. $\sigma_p = 0$ och $\sigma_t = 0$, ger ekvation (A16) att penetrationen blir $P = Lf(\rho_t/\rho_p, 0, 0)$ oberoende av hastigheten. Samma formel för penetrationen fås approximativt i fallet med mycket hög anslagshastighet v även om materialen har hållfasthet, eftersom det då gäller att $\sigma_p/(\rho_p v^2) \approx 0$ och $\sigma_t/(\rho_t v^2) \approx 0$. Detta överensstämmer med den välbekanta formeln $P = L(\rho_p/\rho_t)^{1/2}$ från den hydrodynamiska teorin för RSV-penetration.

När behandlingen av ett visst problem görs mer och mer noggrant genom att fler fysikaliska fenomen inkluderas och t.ex. genom att mer komplicerade materialsamband användes, händer det ofta att antalet pi-termer ökar. Det kan då bli svårt att skala på ett sådant sätt att alla pi-termer blir lika i modell och fullskala. Dimensionsanalysen tillhandahåller en begreppsapparat för att disku-

tera felen i en approximativ skalning. I en exakt skalning ska alla pi-termerna ha samma värden i modellen som i full skala (situationerna är similära). I praktiken får man ofta nöja sig med att kräva att de viktiga pi-termerna är lika i modell- och fullskala, medan en rest av oviktiga pi-termer tillåts variera med skalfaktorn. De är oviktiga i betydelsen att de endast spelar rollen av små korrekationer i sambanden mellan de viktiga pi-termerna.

Bilaga 2. Kontinuummekaniska simuleringar

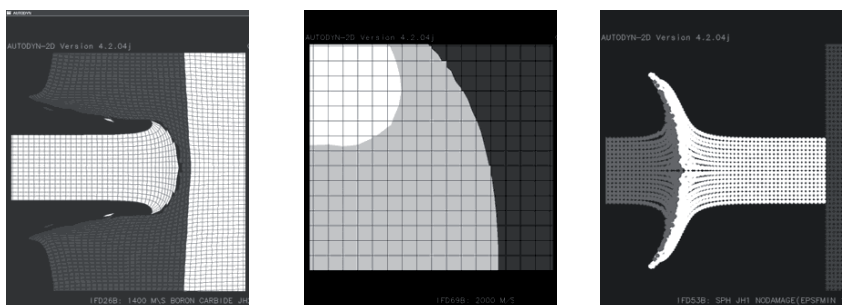
Många av de fenomen som behandlas i denna bok kan simuleras med så kallade kontinuummekaniska simuleringsprogram. Det gäller t.ex. detonation, strålbildning och penetration för RSV-laddningar och vidare olika pansarkonstruktioners förmåga att motstå projektiler, splitter och tryckvågor. I denna bilaga ska vi ta upp några aspekter på sådana simuleringar i anslutning till några exempel.

Program och metoder

Simuleringsprogrammen bygger på mekanikens lagar (konservering av massa, rörelsemängd och energi) och konstitutiva samband för materialen, som vi återkommer till senare. Formuleringen av ett problem kan kräva olika antal rumsdimensioner. Stridsdelar är ofta rotationssymmetriska, och en projektil som träffar en cirkulär plåt i centrum under rät vinkel är också ett exempel på ett rotationssymmetriskt problem. I sådana fall räcker det att använda två rumskoordinater, nämligen en axiell och en radiell. Man säger att problemet är *tvådimensionellt* (2D). Om projektilen träffar plåten i sned vinkel blir problemet däremot *tredimensionellt* (3D). Om man vill inkludera en realistisk fragmentering av en granat är även detta problem 3D. Ett sprängämnesklot som initieras i centrum och befinner sig högt över marken är ett exempel på ett sfäriskt symmetriskt problem och är därmed *endimensionellt* (1D) fram till tidpunkten då stötvågen når marken.

Diskretisering i rummet

De numeriska metoderna bygger alltid på en rumsdiskretisering av problemet. För solider är det ofta naturligt att dela in dem med hjälp av ett nät (*eng.* mesh eller grid) som följer med materialet i dess rörelse och deformation. Ett sådant nät sägs vara av Lagrange-typ. (Man säger att materialen är representerade med *Lagrange-koordinater* eller att datorprogrammet är ett Lagrange-program.) Figur B1(a) visar ett exempel på penetration av en projektil (2D) och man ser att rutnätet som var rektangulärt vid tiden noll har deformerats. Rutorna i nätet kallas oberoende av om det är fråga om 2D eller 3D för element, celler, zoner, e.d. Hörnen på elementen kallas noder. Elementen är oftast fyrhörningar i 2D och motsvarigheten i 3D är hexaedrar. Även trianglar respektive tetraedrar används.



Figur B1. (a) Lagrange-koordinater. (b) Euler-koordinater. (c) SPH. (Källa: FOI)

Man kan även ha ett i rummet fixt nät och låta materialen strömma från cell till cell. Ett sådant nät sägs vara av Euler-typ, man säger också att man använder *Euler-koordinater*. I det fallet behöver nätet vara så stort att det ger utrymme för den förväntade rörelsen hos ingående material. Programmen måste också kunna hantera situationen med flera material i samma cell, se figur B1(b).

Det är lättare att hålla reda på materialgränser och lättare att införa historieberoende materialmodeller i Lagrange- än i Euler-koordinater. En nackdel med Lagrange-koordinater är att tidssteget måste minskas när elementen trycks ihop och distorderas (se nedan).

En metod som är en generalisering av både Lagrange- och Euler-koordinater kallas ALE (Arbitrary Lagrange Euler). Den är programmerad så att nätet kan röra sig (oberoende av materialet) enligt någon specificerad regel. En sådan regel kan vara att låta randnoderna till en solid kropp (t.ex. en studsande boll) följa materialet, medan de inre noderna flyttas så att nätet inuti blir snyggt, så att man undviker deformerade och hoptryckta celler som annars skulle sänka tidssteget.

En annan metod, kallad SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), är att representera materialet med små partiklar, som inte sitter som noder i ett nät. De påverkar varandra på lämpligt sätt med krafter, som svarar mot spänningarna i materialet. Se figur B1(c) som visar en cylindrisk projektil som träffar en annan cylinder. SPH räknas som en Lagrange-metod eftersom varje partikel representerar samma materialpunkt under hela simuleringen. Metoden är också bra på att hantera stora deformationer eftersom partiklarna inte sitter fast i något nät som behöver distorderas utan kan röra sig friare i förhållande till varandra. Metoden utvecklades ursprungligen inom astrofysiken för att behandla stora gasmoln, men har sedan formulerats av Libersky även för solider [4]. Vissa problem finns fortfarande med metoden. En rekommendation går ut på att undvika SPH i situationer med mycket dragspänningar, eftersom partiklarna då på ett ofysikaliskt sätt kan tappa kontakten med varandra (numerisk fragmentering).

En annan aspekt på rumsdiskretiseringen, som här bara ska antydast, är valet av de algoritmer som används. Den traditionella metoden i Lagrange-program är finita differenser (FD) (eller kanske bör den hellre kallas finit volym), se t.ex. [5]. Numera används i regel finita element metoden (FE), där olika elementtyper kan förekomma. Noterbart är att FD-formuleringen, som används i Lagrange-program, måste vara formulerad så att den fungerar trots att nätet har deformerats, och den blir därigenom mer komplicerad än en FD-formulering på rektangulärt nät.

Explicita och implicita program

Problemen som simuleras är kortvariga transienta vågutbredningsproblem. Deformationerna är stora och snabba. Man måste ta hänsyn till att ljudvågor (och andra deformationer) utbreder sig med ändlig hastighet i materialen. Problemen är kortvariga i den meningen, att en ljudvåg inte hinner gå så värst många gånger fram och tillbaka genom provet under den tid som simuleringen varar. Dessa egenskaper har betydelse för val av program och metoder. Man behöver andra metoder än dem som används för stationära och kvasistationära problem inom hållfasthetsläran. För våra problem är program med s.k. *explicit* tidsintegrering att föredra, medan *implicita* program används för långsammare och långvarigare deformationer. I en explicit metod tillämpas explicita formler för tidsstegningen, medan man i en implicit metod måste lösa ett stort ekvations-system för varje tidssteg. Priset för enkelheten hos den explicita metoden är att tidssteget måste väljas så kort att en ljudvåg inte hinner passera ett element under motsvarande tid. I våra problem, som innehåller snabba deformationer och höga hastigheter, är det ofta inte en allvarlig begränsning, eftersom tidssteget ändå måste väljas kort för att tillräckligt väl upplösa de snabba förloppen.

Materialmodeller

Relevanta materialmodeller är väsentliga för goda resultat med simuleringsprogrammen. Modellerna måste gälla för stora och snabba deformationer och hänsyn tas till vissa termodynamiska fenomen även om värmeledning ofta försummas på grund av att den är en långsam process.

En materialmodell ska kunna förutsäga de inre krafterna (spänningarna) i materialet om deformationen är känd. Ideala gaslagen, som är ett samband mellan tryck, volym och temperatur, är i all sin enkelhet en materialmodell för en ideal gas utan viskositet. I simuleringsprogram brukar man använda en annan termisk variabel än temperaturen, nämligen inre energin per massenhet, E . I så fall har ideala gaslagen formen

$$p = f(\rho, E) \quad (\text{B1})$$

där p är trycket och ρ densiteten. Genom att välja funktionen f på lämpligt sätt, duger sambandet även för andra gaser och vätskor (fluider). För solider är det inre kraftspelet mer komplicerat, man behöver sex spänningskomponenter (tre normalspänningar och tre skjuvspänningar) för att beskriva spänningstillståndet. Trots det är modellerna ofta programmerade så att en ekvation av typen (B1) i alla fall utgör en komponent i materialmodellen. För gaser är det lätt att tänka sig att densiteten kan variera mycket under simuleringen, men för våra problemtyper gäller det även för solider. Om trycket är tillräckligt högt kan metaller komprimeras något eller några tiotals procent. Tillståndsekvationen (B1) måste alltså gälla i ett mycket stort tryck- och densitetsområde.

Förutom sambandet mellan tryck och densitet tillkommer för solider modellering av hållfasthet och brott. Vid ett vanligt dragprov ökar spänningen (kraften dividerad med tvärsnittsarean) som funktion av töjningen upp till en viss gräns, flytspänningen, då provstaven börjar deformeras plastiskt. Skulle provet avlastas, skulle det inte återgå till sin ursprungliga längd, utan provstaven skulle vara permanent deformerad. Under den plastiska deformationen ökar normalt flytspänningen på grund av så kallat deformationshårdnande. I simuleringsprogram är modellerna formulerade för ett flerdimensionellt spännings- och töjningstillstånd. Men även då kan hållfastheten beskrivas av en flytspänning hos materialet. Denna kan i enklaste fallet vara konstant, men i mer realistiska fall varierar den under simuleringen. Modeller som beskriver det elastiskt-plastiska beteendet hos metaller låter ofta hållfastheten öka när materialet deformeras plastiskt (deformationshårdnande) och minska vid förhöjd temperatur (termiskt mjuknande). Många metaller uppvisar dessutom förhöjd hållfasthet vid höga töjningshastigheter (töjningshastighetsberoende). En ofta använd fenomenologisk modell av Johnson och Cook [6] är ett exempel på en sådan modell. Där beror flytspänningen

$$\sigma_Y = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - (T^*)^m \right) \quad (\text{B2})$$

på tre variabler, nämligen plastiska töjningen ε , plastiska töjningshastigheten $\dot{\varepsilon}$ och homologa temperaturen, T^* . Den sistnämnda är en temperatur som är skalad så att $T^* = 0$ vid rumstemperatur och $T^* = 1$ vid smälttemperaturen, dvs.

$$T^* = \frac{T - T_{rum}}{T_{smält} - T_{rum}} \quad (\text{B3})$$

där T är vanliga temperaturen. I ekvation (B2) är vidare A , B , C , n , m och $\dot{\epsilon}_0$ positiva konstanter, varav den sistnämnda normalt har värdet $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$. Första parenteserna i ekvation (B2) uttrycker deformationshårdnandet, den startar på värdet A och ökar sedan när ϵ ökar. Exponenten n ligger normalt mellan 0 och 1. Sista parenteserna ger det termiska mjuknandet, hållfastheten sjunker med ökande temperatur och upphör helt vid smälttemperaturen. Om exponenten m är en bra bit större än 1, kommer det termiska mjuknandet att bli svagt vid måttliga temperaturförhöjningar och accelerera in emot smälttemperaturen. Mittersta parenteserna i ekvation (B2) är till för att ge en förhöjning av hållfastheten vid höga deformationshastigheter.

Spröda material såsom keramer, berg och betong kräver andra modeller än för metaller som är mer duktila¹²³. Plastiska deformationen som ett sprött material undergår före brott är liten eller obefintlig. I extremfallet uppför sig materialet linjärelastiskt fram till brott. Betong är poröst och materialmodeller måste ta hänsyn till att porerna kompakteras om betongen utsätts för högt tryck. Keramiska material av den typ som är aktuella i ballistiska skydd är däremot täta. Som bekant är hållfastheten i tryck mycket större än i drag för keramer och betong (här avses enaxligt tryck och drag). Det sammanhänger med att hållfastheten ökar med ökande hydrostatiskt tryck (ett tryck som verkar runt om från alla håll, såsom i en vätska). Hydrostatiska trycket gör nämligen att sprickors uppkomst och tillväxt förhindras eller fördröjs. Exempel på modeller är modellen av Johnson och Holmquist [7-8] för keramer samt den så kallade RHT-modellen för betong [9], utvecklad vid Ernst-Mach-Institut (EMI) i Tyskland. Dessa modeller är tyvärr relativt komplicerade.

Modeller för sprängämnen behövs vid simulering av stridsdelar, såsom strålbildningen i en RSV-laddning. En modell består av en tillståndsekvation som ställts upp av Jones, Wilkins och Lee och därför kallas JWLEkvationen. Den är av typen (B1) och beskriver tryck-volym-energisambandet för spränggaserna som till att börja med har en för gaser mycket hög densitet. Data till JWLEkvationen finns i referensen [10]. Detonationen kan modelleras på olika sätt. Ofta räcker det med att föreskriva utbredningshastigheten hos detonationsvågen från initieringspunkten (så kallad styrd detonation). Vid studium av okänslig ammunition kan man vilja simulera beskjutning av granater för att se om sprängämnet detonerar eller inte. I så fall behövs en mer fysikalisk modell sprängämnet. Ett exempel på en sådan modell är modellen av Lee och Tarver [11].

123. Se avsnitt 3.3.1.

Numerisk erosion och artificiella viskositeter

Vid simulering av kollisioner i Lagrange-program behövs vad man kallar *kontaktvillkor* för att hantera kontaktkrafterna. Många metoder går ut på att göra kontakten fjädrande (istället för stum). Vid simulering av projektil och pansar måste också penetrationen kunna hanteras. En vanlig (om dock inte invändningsfri) metod att hantera detta är erosion, eller rättare sagt *numerisk erosion*, för att inte förväxla det med verklig erosion som t.ex. en pansarbrytande pilprojektil blir utsatt för. Numerisk erosion innebär att element i nätet som är för mycket deformerade (enligt något kriterium) tas bort. Den massa och energi som då försvinner ur nätet kan tas bort eller hellre omvandlas till fria noder som växelverkar med Lagrange-material om kontakt uppstår. Ett bättre sätt att behandla dessa fria noder, kallat GPA (Generalized Particle Algorithm), har utvecklats av Johnson och Stryk [12], men finns ännu inte tillgängligt i kommersiella program som FOI har tillgång till. Hela problematiken kring den numeriska erosionen kan undvikas genom att använda Euler-koordinater eller SPH-representation.

Den numeriska lösningsmetoden kräver en del parametrar som beskriver egenskaper hos materialen utan att vara egentliga fysikaliska materialparametrar. Tidigare har vi talat om erosion, och parametern som anger gränsen för hur deformerad en cell får bli innan den tas bort är en sådan parameter. Vidare har vi parametrar som anger olika typer av *artificiella viskositeter*. Kraftiga kompressionsvågor har en tendens att bli brantare med tiden så att stötvågor uppstår. En vanlig metod att hantera detta är att införa en artificiell viskositet, som gör att stötvågens branthet begränsas och att den därför smetas ut över några element i nätet. Ett annat problem är *timglassvängningar*, som fått sitt namn av att Lagrange-nätet deformeras så att det liknar timglas. I alla fall för enklaste typen av element gäller att dessa svängningar inte motverkas av någon inre kraft i materialet. De skulle därför kunna växa spontant, om de inte motverkades av en typ av artificiell viskositet.

Datorprogram

De flesta av exemplen nedan är simulerade med programmet AUTODYN från Century Dynamics, USA. Det finns både som 2D- och 3D-program. Det har både Lagrange och Euler-representation liksom även SPH och en form av ALE. Material med olika representation kan givetvis förekomma i samma simulering och växelverka med varandra.

Ett annat mycket välkänt program är DYNA, utvecklat av John Hallquist vid Lawrence Livermore National Laboratory i USA. Det vidareutvecklas och tillhandahålls av honom i firman Livermore Software Corp., USA. Programmet var ursprungligen ett rent Lagrange-program men innehåller numera även ALE-representation, varav Euler-representation är ett specialfall.

Vid FOI användes båda dessa kommersiellt tillgängliga program liksom ett par egenutvecklade program, GRALE för 2D [13] och KRYP för 3D [14], båda utvecklade av Lars Olovsson.

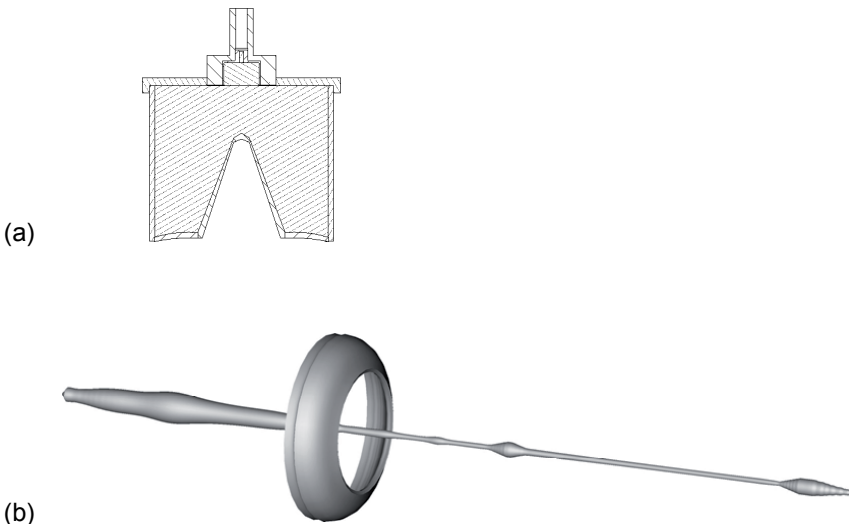
I litteraturen förekommer referenser till många program som inte är kommersiellt tillgängliga. Av dessa kan nämnas EPIC utvecklat av Gordon Johnson och CTH utvecklat vid Sandia Laboratory, USA. EPIC var från början ett rent Lagrange-program, men har sedan försetts med en förbättrad form av numerisk erosion där de borttagna Lagrang-elementen omvandlas till GPA-partiklar [12]. CTH är ett rent Euler-program.

Det kan nämnas att två av de äldsta programmen i denna genre är TOODY och HEMP utvecklade vid Sandia Laboratory, USA respektive Lawrence Livermore National Laboratory, USA.

Exempel på simuleringar

RSV, strålbildning

Deformationerna, när inlägget i en RSV-laddning trycks ihop och strålen bildas, är alltför stora för att det ska kunna simuleras med Lagrange-nät. Förr simulerade man förloppet fram till kollapsen och kopplade sedan på ett efterbehandlingsprogram, som med analytiska approximationer räknade ut stråldata. Nu kan hela förloppet simuleras med Euler-koordinater.



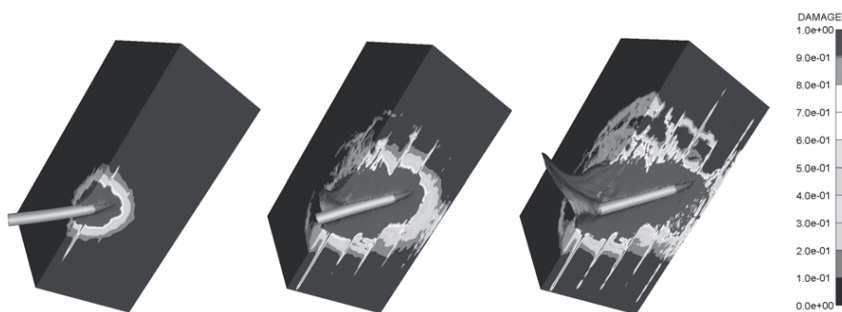
Figur B2. (a) RSV-laddning av tandemtyp med diameterna 114 mm. (b) Stråle och EFP från denna laddning 80 μ s efter initiering. (Källa: A. Helte, FOI, [15])

Vi tar ett exempel från en studie av Helte m.fl. [15] av en tandemladdning som visas i figur B2(a). Det koniska inlägget ger på vanligt sätt upphov till en stråle, medan den mera plana delen vid konbasen ger upphov till en ringformad projektil, jämför projektilbildande RSV (*eng.* EFP, Explosively Formed Projectile). Figur B2(b) visar resultatet av simuleringen, som utförts med det två-dimensionella programmet GRALE.

Projektil mot betongskydd

Omfattande simuleringar har utförts med programmet AUTODYN av projektiler som träffar betongskydd, med och utan armering, och av betong med olika kvalitet. Vid snett anslag måste 3D-versionen av programmet användas. Men även vid rätvinkligt anslag behövs 3D, om armeringsjärnen ska kunna modelleras korrekt. Eftersom simuleringarna är tidskrävande, genomförs de ofta genom parallell exekvering på flera sammankopplade datorer.

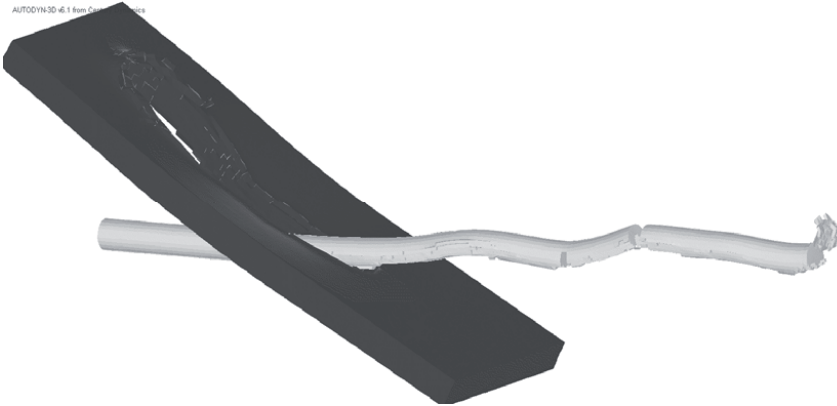
Figur B3 visar resultatet av en simulering av ett armerat betongmål som träffas i sned vinkel av en projektil, referens [16]. Projektilen deformerar nästan inte alls vid den aktuella anslagshastigheten. För betongen används en materialmodell, kallad RHT-modellen som finns införd i AUTODYN.



Figur B3. Projektil med anslagshastighet 420 m/s penetrerar ett block av armerad betong med tjockleken 540 mm. Plottarna är tagna 0,4 ms, 1,2 ms och 4,4 ms efter anslag. Färgskalan visar skadenivåerna i betongmodellen. (Källa: H. Hansson, FOI [16])

Pilprojektil mot snedställd rörlig plåt

Följande simulering är gjord med AUTODYN-3D och Lagrange-kordinater för att studera ett delförlopp i ett aktivt pansar. En pilprojektil träffar en snedställd rörlig plåt och penetrerar men är störd på olika sätt (böjd och har fått transversell rörelse). Resultatet visas i *Figur B4*.



Figur B4. Pansarbrytande pilprojektil störs av rörlig snedställd plåt. (Källa: A. Tjärnberg, FOI)

RSV-stråle mot aktiv panel

En aktiv pansarpanel bestående av två plåtar med sprängämne emellan träffas av en RSV-stråle. Figur B5 visar resultatet av simuleringen som gjorts med AUTODYN-3D. Plåtarna och strålen är representerade i ett Lagrange-nät medan sprängämnet finns i ett Euler-nät.

Källförteckning

Tryckta källor

- Andersson, C., Stenström, M. och Wiss, Å. *Värdering av HPM-vapen och skydd. En komparativ studie av HPM- och konventionella vapen.* FOI--0664--SE. december 2002.
- Andersson, Håkan. *Hotbildsstudie. Högeffekt Pulsad Mikrovågsstrålning (HPM),* FOA-R--99-01244-612--SE. Linköping: FOA, november 1999.
- Anderson, J.D. *Fundamentals of Aerodynamics.* 4th edition. New York: McGraw-Hill Science Engineering, 2005.
- Andersson, Kurt. et al. *Lärobok i Militärteknik, vol. 1: Grunder.* Stockholm: FHS, 2007.
- Arbman, Gunnar et al. (2002) *Primitiva kärnladdningar – ett realistiskt hot?* FOI-R--0735--SE. Umeå: FOI, 2002.
- Artman, Kristian och Westman, Anders. *Lärobok i Militärteknik, vol. 2: Sensortechnik.* Stockholm: FHS, 2007.
- Axberg, S. ”Om missilerna kommer”. *Missilhot mot Sverige? Förvarsberedningens skrifter 2/2001.* Stockholm, 2001.
- Baily, A & Murray, S.G. *Explosives, propellants & Pyrotechnics.* London: Brassey's (UK), 1989.
- Baum, C.E. et al. ”JOLT, A Highly Directive, Very Intensive, Impulse-Like Radiator”. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, No. 7, July 2004.

- Behm, Elisabeth et al. *Explosivämneslära*. Kompendium. Stockholm: FOI, 1999.
- Berglund, Erik. *Luftvärnskanoner mot manövrerade mål*. FOA C 20816-2.5, 8.4. Stockholm: FOA, 1990.
- Berglund E. *Teknisk hotbild 2015-2025. Delrapport 1 – Teknikutveckling*, FOA-R--98-00890-201--SE. Stockholm: FOA, 1998.
- Brandt, S.A., Stiles R.J, Bertin J.J. & Whitford, R. *Introduction to aeronautics: a design perspective*. 2nd edition. AIAA education series. Reston, Va, 2004.
- Bryntse, Anders. *Modellering av luftstövåg från VBIED*. FOI-R--2500--SE. ISSN 1650-1942. Stockholm: FOI, juni 2008.
- Casali, A. & Cattaruzza, M. *Sotto i mari del mondo. La Whitehead 1875-1990*. Rom: Laterza: 1990.
- Chefen för armén. *Skjutlära för luftvärnet*. M7742-146001, Skjutlära Lv, Eldrörsvapen. Stockholm: Försvarets läromedelscentral, 1990.
- Ellsén, J. (ed.). *Svensk Torped 100 år 1876–1976*. Motala: Torpeden 100 år, 1976.
- Fleeman, E., Berglund, E. & Licata, W. *Technologies for Future Precision Strike Missile Systems*. RTO-EN-018. AC/323 (SCI-087 bis)TP/37. RTO/NATO. Neuilly-sur-Seine, 2001.
- FMV. *Ammunitionslära för armén, (Amlära A)*. FMV-A M77:21/79, M7730-850020. Stockholm: FMV, 8 mars 1979.
- FMV. *Torpedteknik*. Kompendium. Stockholm: MHS, 1992.
- FMV. *Tekniska utvecklingstrender*. FMV beteckning; Analys 23210:2515/2001. Stockholm: FMV, 2001.
- FOA. *Robotvapen*. FOA orienterar om. Vol. 9. Stockholm: FOA, 1968.
- FOA. *Vapenverkan*. FOA informationskrift 1983. ISBN 91-38-07932-1. Stockholm: FOA, 1983.
- FOA. *FOA Orienterar om kärnvapen*. ISBN 91-7056-076-5. FOA Orienterar Om, nummer 15. Stockholm: FOA, 1990.
- FOI. *Elektromagnetiska vapen och skydd*. ISBN 91-7056-104-4. FOI Orienterar Om, nummer 1. Stockholm: FOI, 2001.
- FOI. *Kemiska Vapen – hot, verkan och skydd*. FOI Orienterar Om, nummer 2. Umeå: FOI, 2002.

- Frost, C. och Ånäs, P. *Förstudie rörande vitala samhällssystemens motståndsförmåga mot elektromagnetisk strålning med hög intensitet (HPM)*. FOA-R--97-00538-612--SE. Linköping: FOA, 1997.
- Fulghum, David A. "UCAVs Also Tagged To Carry Energy Weapons". *Aviation Week & Space Technology*, 8 juli 2002.
- Fulghum, David A. "U.S. Funds British Energy Weapon Tests". *Aviation Week & Space Technology*, 16 september 2002.
- Fulghum, David A. "USAF Acknowledges Beam Weapon Readiness". *Aviation Week & Space Technology*, 4 oktober 2002.
- Fulghum, David A. "Microwave Weapons Emerge". *Aviation Week & Space Technology*, 13 juni 2005.
- Försvarsmakten. *Skjutlära för armén*. M7742-186012, Skjutlära A. Stockholm: Försvarets läromedelscentral, 1986.
- Försvarsmakten. *Sjöartilleriets grunder*. Sjöart grunder. M7744-738101. ISBN 91-972385-2-X. Stockholm: Enator Försvarsmedia, 1997.
- Försvarsmakten SWEDINT. *Underlag från erfarenhetsseminarium KS03, 2001-06-06*. 19 440:51386. 11 juni 2001.
- Gozna, Lynsey F. *1st European Symposium on Non-Lethal Weapons*. Centre of Human Sciences, QinetiQ, Ertlingen, GE, 25-26 september 2001.
- Grenander, Gunnar. *Vapenlära för armén (Vapenlära A)*. M7742-108001. Stockholm: Försvarets Läromedelscentral, 1986.
- Janzon, Bo. *Underlag för verkansberäkningar. Splitters luftmotstånd*. FOA 2 rapport, A 2539-44. Stockholm: FOA, maj 1971.
- Kaplan, E. & Hegarty, C. (eds.). *Understanding GPS: principles and applications*. 2nd ed. Artech House, Norwood, MA, 2006.
- Kopp, C. "An Introduction to the Technical and Operational Aspects of the Electromagnetic Bomb". ISSN 0192-492X. *Journal of Electronic Defence*, Supplement, januari 1997.
- Lidén, Ewa., Holmberg, Lars., Mellgard, Ingegärd och Westerling, Lars. *Stridsdelar, skydd och deras växelverkan*. ISSN 1104-9154. FOA-R--94-00035-2.3--SE. Stockholm: FOA, oktober 1994.
- Lidén, Ewa., Örnhed, Håkan., Skoglund, Melker. *Verkan av IDV-ammunition. Svensk ammunition testad mot surrogatbröstkorg*. ISSN 1650-1942. FOI-R--2333--SE, Teknisk rapport. Stockholm: FOI, 2007.

- Lillberg, Eric & Fureby, Christer. *A Computational Study of Vortex Ring Generation*, FOA-R--99-01290-310--SE. Stockholm: FOA, 1999.
- Lin, C-F. *Modern Navigation Guidance and Control Processing*. ISBN-13: 978-0135962305. Prentice Hall Series in Advanced Navigation, Guidance, and Control, 1991.
- Newman, J. N. *Marine hydrodynamics*. MIT Press. Cambridge, MA, 1977.
- Regeringskansliet. *Göteborgskommissionen*. SOU 2002:122.
- Silfverskiöld, S., et al. *Studien ATK 99064S HPM – hot och möjlighet i NBF* 2003. Bilaga 1 till 12 860:77394, Försvarmakten, 1 december 2003.
- Spohrer, M. "Multipurpose Launcher for Non-Lethal Effectors". Proceedings of European Symposium on Non-Lethal Weapons, 24-26 September 2001.
- Sumer, B.M. & Fredsö, J. *Hydrodynamics around cylindrical structures*. World Scientific Publishing Co. Singapore, 2006.
- Sundberg, Ulf. *Internationella erfarenheter från medverkan i utveckling av icke dödande vapen. Slutrapport-Vapensystem för Graderad Verkan*. ISSN 1650-1942. FOI-R--1478--SE. Stockholm: FOI, december 2004.
- Tyrberg, Andreas & Menning, Dennis. *Lägesrapport – Klassificering av hotbild IED*. FOI-R--2255--SE. Stockholm: FOI, 2007.
- Törnblom, H. *Robotteknik allmän kurs*. Utkast till kurskompendium för Chefsprogrammet. Version 0.26. Stockholm: FHS, 2007.
- Wrangel, H. *Svenska flottans bok: en populär framställning af vårt sjövapens utveckling och nuvarande ståndpunkt jämte skildringar af tjänsten och lifvet ombord: bilder från äldre och nyare tider m.m.* Stockholm: Seligmanns förlag 1898.
- Överbefälhavaren. *Fortifikationshandbok del 1, FortH 1*. M7747-707112. Stockholm, 1991.
- Överbefälhavaren. *Fortifikationshandbok del 4, FortH 4*. M7747-707142. Stockholm, 1991.

Källor på internet

- <[http:// www.cdiss.org](http://www.cdiss.org)> (Centre for Defence ant International Security Studies (CDISS))
- <<http://www.rmcs.cranfield.ac.uk/aerextra/exballs.htm>>
- <<http://www.steyrscout.org/extbal.htm>>
- <<http://www.nennstiel-ruprecht.de/bullfly>>
- <<http://www.eskimo.com/~jbm/ballistics/calculations.html>>
- <http://www.norma.cc/htm_files/javapageem.htm>
- <<http://eurekaerospace.com/hpems.php>>
- <<http://www.diehl-bgt-defence.de/index.php?id=571&L=1>>
- <<http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/design.htm>>
- <<http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/395689.stm>>

Referenser till Bilaga A och B

1. Baker, W.E., Westin, P.S., Dodge, F.D. "Similarity Methods in Engineering Dynamics: Theory and Application of Scale Modeling". Hayden, New Jersey, USA, 1978.
2. Anderson, C.E. Jr., Mullin, S.A., Kuhlman, C.J. "Computer simulations of strain-rate effects in replica scale model penetration experiments", *International Journal of Impact Engineering* Vol. 13, No. 1 (1993), pp. 35-52.
3. Holmberg, L., Lidén, E., Westerling, L. *Kan man lita på modellskalet försök?* FOA-R--00-01584-310--SE. Stockholm: FOA, 2000.
4. Libersky, L.D., Petschek, A.G., Carney, T.C., Hipp, J.R., Allahdadi, F.A. "High Strain Lagrangian Hydrodynamics: A Three-Dimensional SPH Code for Dynamic Material Response," *Journal of Computational Physics*, Vol. 109, No. 1 (1993), pp. 67-75.
5. Wilkins, M.L. "Calculation of Elastic-Plastic Flow", *Method of Computational Physics*, Vol. 3, pp. 211-263, eds. B. Adler, S. Fernbach, M. Rotenberg. New York: Academic Press, 1964.
6. Johnson, G.R., Cook, W.H. "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, 1983.

7. Johnson, G.R. and Holmquist, T.J. "An improved computational constitutive model for brittle materials," *High Pressure Science and Technology–1993*, Vol. 2, pp. 981-984 (Edited by S. C. Schmidt, J. W. Shaner, G. A. Samara and M. Ross). New York: AIP Press, 1994.
8. Johnson, G.R. and Holmquist, T.J. "Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressure," *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No. 12 (1999), pp. 8060-8073.
9. Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S., Schmolinske, E. "Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500. Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes," Proc. of 9th Int. Symp. on Interaction of the Effects of Munitions with Structures (1999), pp. 315-322.
10. Lee, E.L., Hornig, H.C., Kury, J.W. "Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products," UCRL-50422, May 2, 1968.
11. Lee, E.L., Tarver, C.M. "Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogenous Explosives," *Physics of Fluids*, Vol. 23 (1980), p. 2362.
12. Johnson, R.G., Stryk, R.A. "Conversion of 3D distorted elements into meshless particles during dynamic deformation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28 (2003), pp. 947-966.
13. Olovsson, L., Helte, A. "GRALE2D – an explicit finite element code for two-dimensional plane and axi-symmetric multi-material ALE simulations," *Computational Ballistics II*, V. Sanchez-Galvez, C. A. Brebbia, A. A. Motta, C. E. Andersson, eds. Southampton: WIT Press (2005), pp. 137-145.
14. Olovsson, L. *KRYP, a Finite Element Tool for Crystal Plasticity Analyses*. FOI-R--0374--SE. Stockholm: FOI, 2002.
15. Helte, A., Carlsson, T., Hansson, H., Karlsson, S., Lundgren, J., Westerling, L., Örnhed, H. "Wall breaching tandem warhead," Proc. 22nd Int. Symp. Ballistics, Arlington, VA., USA, 2005.
16. Hanson, H. *Simulation of penetration in normal strength concrete for a projectile with $L/D = 9$* . FOI-R--1759--SE. Stockholm: 2005.

Om bokens författare

Boken har skrivits av forskare vid Försvarets forskningsinstitut, FOI, och lärare vid Förvarshögskolan, FHS, alla med mycket lång erfarenhet inom sina respektive ämnesområden.

Kurt Andersson (kapitel 10, 13 och redaktör) är civilingenjör (flygteknik) och har tjänstgjort såväl som forskare/institutionschef vid FOA (numera FOI) som lärare vid FHS.

Stefan Axberg (kapitel 1, 11, 12) är professor i Militärteknik vid FHS, affilierad professor vid KTH och har tidigare bl.a. tjänstgjort vid FMV och som adj. professor vid Lunds Tekniska Högskola.

Per Eliasson (kapitel 2) är övlt. i armén. Chefsutbildad med vapen- och skyddsteknisk inriktning.

Staffan Harling (kapitel 15) är civilingenjör (skeppsteknik). Har tidigare tjänstgjort i marinen som mariningenjör. Anställd vid FOI och har där bl.a. arbetat med verkan i sjömål och simulering av luftvärns- och robotsystem samt med riskbedömning av olika typer av splittrstridsdelar.

Lars Holmberg (1946-2007)(kap 3, 4, 5, 10) var civilingenjör (farkostteknik) och arbetade som forskare vid FOI avdelning Försvars- och säkerhetssystem (tidigare Vapen och skydd) inom området fysiskt skydd mot konventionella vapeneffekter, framför allt inriktat mot pansarvärn.

Ewa Lidén (kapitel 3, 4, 5, 10) är tekn. lic. (teknisk fysik) och anställd som forskare vid FOI avdelning Försvars- och säkerhetssystem (tidigare Vapen och

skydd). Arbetar för närvarande som projektledare inom området "Verkan och skydd - tekniska hot och möjligheter" och representerar Sverige och FOI i International Ballistics Committee samt diverse europeiska samverkansgrupper.

Michael Reberg (kapitel 7) är övlt. i armén med en bakgrund som truppofticer i luftvärnet och genomgången chefsprogram med militärteknisk inriktning (ChP T) vid Försvarshögskolan. Han tjänstgör som avdelningschef för ChP T.

Stefan Silfverskiöld (kapitel 6) är kk. och tekn. dr och tjänstgör vid FHS. Har varit ordförande för FM-studien "HPM - hot och möjlighet i NBF" och ordförande för FoT-grupp Telekrig samt Produktansvarig för FM Forskning och teknikutveckling.

Ulf Sundberg (kapitel 9) är övlt. (PA) vid artilleriet. Projektansvarig för "Graderad verkan med Icke Dödande Vapen". Har varit FOA samverkansofficer, FM studiesamordnare och ordförande för FoT-grupp "Vapen och Skydd" och är bl.a. medlem i "European Working Group for Non Lethal Weapons".

Lars Tornérhielm (kapitel 1, 14) är övlt. (PA) i armén och har tjänstgjort bl.a. vid FMV och som lärare vid FHS.

Bengt Vretblad är professor emeritus i Skyddsteknik vid FHS. Han har tidigare tjänstgjort bl.a. vid FortF Forskningsbyrå.

Lars Westerling (Bilagor) tekn.lic. (tekn.fysik) har under många år tjänstgjort vid FOI och då speciellt arbetat med modellering av penetrationsförlopp.

Serien "Lärobok i Militärteknik"

- Nr. 1 Kurt Andersson, Kristian Artman, Magnus Astell, Stefan Axberg, Hans Liwång, Anders Lundberg, Martin Norsell och Lars Tornérhielm, *Lärobok i Militärteknik, vol. 1: Grunder* (Stockholm: Försvarshögskolan, 2007). ISSN 1654-4838, ISBN 978-91-85401-72-7.
- Nr. 2 Kristian Artman och Anders Westman, *Lärobok i Militärteknik, vol. 2: Sensorteknik* (Stockholm: Försvarshögskolan, 2007). ISSN 1654-4838, ISBN 978-91-85401-73-4.
- Nr. 3 Sven Grahn och Kristina Pålsson, *Lärobok i Militärteknik, vol. 7: Rymdteknik* (Stockholm: Försvarshögskolan, 2007). ISSN 1654-4838, ISBN 978-91-85401-77-2.
- Nr. 4 Azriel Lorber, *Lärobok i Militärteknik, vol. 8: Oförstånd och okunskap – konsekvenser för alla militära nivåer* (Stockholm: Försvarshögskolan, 2007). ISSN 1654-4838, ISBN 978-91-85401-79-6.
- Nr. 5 Kurt Andersson, Stefan Axberg, Per Eliasson, Staffan Harling, Lars Holmberg, Ewa Lidén, Michael Reberg, Stefan Silfverskiöld, Ulf Sundberg, Lars Tornérhielm, Bengt Vretblad, Lars Westerling, *Lärobok i Militärteknik, vol. 4: Verkan och skydd* (Stockholm: Försvarshögskolan, 2009). ISSN 1654-4838, ISBN 978-91-89683-08-2.

