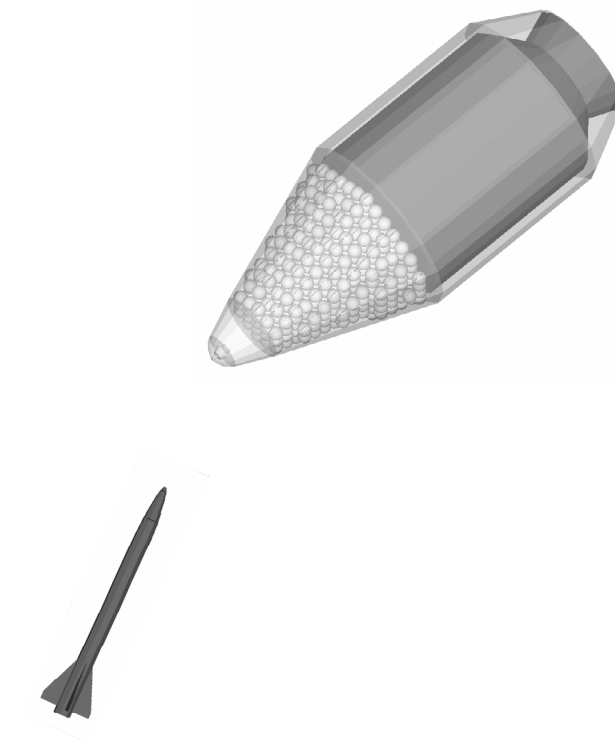


Andreas Tyrberg, Anders Tjernberg, Irina Järnebank, Mats Gustafsson

Värdering av verkan i ballistiska robotar, inledande studie



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Vapen och skydd

147 25 Tumba

FOI-R--1285--SE

Juni 2004

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Andreas Tyrberg, Anders Tjernberg, Irina Järnebark, Mats Gustafsson

Värdering av verkan i ballistiska robotar, inledande studie

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1285--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år Juni 2004	Projektnummer E 2007
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Andreas Tyrberg	Projektledare Gunnar Wijk	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Värdering av verkan i ballistiska robotar, inledande studie		
Sammanfattning (högst 200 ord) För att kunna värdera verkan i ballistiska robotar måste nya fenomen och förlopp studeras som inte förekommer vid värdering av mer ordinära system. Det som främst särskiljer värdering av verkan i ballistiska robotar är de höga relativa hastigheterna mellan vapen och mål samt de ofta unika utformningarna på både mål och bekämpningsvapen. I denna rapport ges en översiktlig beskrivning av ballistiska robotar, olika typer av stridsdelar samt system för bekämpning. Rapporten redovisar några av de förlopp som för denna typ av mål ofta är unika. Följande fall har studerats genom litteraturstudier, simuleringar och beräkningar: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Höga hastigheters inverkan på penetrationsförloppet. ▪ Hur höga relativa hastigheterna påverkar möjligheten för användning av ordinära splitterstridsdelar. ▪ Hur vätskefyllda behållare påverkas när de träffas av olika typer av projektiler. 		
Nyckelord		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 46 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1285--SE	Report type User report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year June 2004	Project no. E 2007
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Andreas Tyrberg	Project manager Gunnar Wijk	
	Approved by	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Weapon effects in ballistic missiles, preliminary study		
Abstract (not more than 200 words) <p>In order to assess weapon effects in ballistic missiles, new phenomena and events, that do not occur when assessing weapon effects in more regular systems, have to be studied. The main distinctions when assessing weapon effects in ballistic missiles are the high closing velocities between weapon and target and the often unique design of both target and weapon.</p> <p>In this report a survey of ballistic missiles, different types of warheads and anti-ballistic missile systems is given. The report gives a description of some of the phenomena that are unique for this type of targets. The following cases have been studied through literature surveys, calculations and simulations:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Penetration in the hypervelocity regime. ▪ High closing velocities' influence on the prospect to use ordinary fragmenting warheads. ▪ How liquid filled containers are effected when hit by different types of projectiles. 		
Keywords		
Further bibliographic information		Language Swedish
ISSN 1650-1942		Pages 46 p.
		Price acc. to pricelist

Innehållsförteckning

1	Bakgrund.....	5
2	Syfte och inriktning.....	5
3	Ballistiska robotar	7
3.1	Stridsdelar	8
3.1.1	Konventionella stridsdelar	8
3.1.2	C-stridsdelar	8
3.1.3	B-stridsdelar	9
3.1.4	N-stridsdelar.....	10
3.2	Återinträde	10
4	Vapen mot ballistiska robotar	11
4.1	Boost Phase Defense.....	11
4.2	Midcourse Defense	11
4.2.1	GMD (Ground-Based Midcourse Defense)	12
4.2.2	SMD (Sea-Based Midcourse Defense)	12
4.3	Terminal Phase Defense	12
4.3.1	THAAD (Theater High Altitude Area Defense).....	13
4.4	Patriot.....	13
4.4.1	Patriotsystemet	14
4.4.2	PAC-2 roboten	14
4.4.3	PAC-3 roboten	14
4.4.4	Patriotsystemet i Gulfkriget	14
4.5	Verkansformer	15
5	Höghastighetsperforation.....	16
5.1	Penetrationsförloppet	16
5.2	Knubbiga projektilers penetration av tunna plåtar	17
5.3	Rörelsemängd hos restfragment.....	19
5.4	Inverkan av projektilform	19
5.5	Inverkan av projektilmaterial	20
5.6	Inverkan av målmaterial	21
5.7	Sammanfattning höga hastigheter	21
6	AVAL simuleringar	22
6.1	AVAL	22
6.2	Målbeskrivning	22
6.3	Vapenbeskrivning	22
6.4	Simuleringar.....	23
6.5	Resultat rakt infall.....	24
6.6	Resultat 30 och 45 graders infallsvinkel.....	26
6.7	Sammanfattning splittersimuleringar.....	31
7	AUTODYN simuleringar.....	32
7.1	AUTODYN	32
7.2	Indata och material.....	32
7.3	Verkan i enskild behållare	33
7.4	Verkan i flera behållare.....	36
7.5	Verkan av direktträffande stridsdel.....	39
7.6	Sammanfattning simuleringar	41
8	Diskussion.....	42
9	Sammanfattning	43
10	Referenser	44
	Bilaga 1	46

1 Bakgrund

Av de hot som ett framtida försvar kan tänkas stå inför tillhör ballistiska robotar en typ av hot som är mycket svårbekämpade ur vapenteknisk synvinkel. Andra länders militära organisationer, främst i USA, har redan tacklat detta hot och stora resurser läggs på utveckling och anskaffning av vapensystem för bekämpning av ballistiska robotar. Även i Ryssland, Israel och flera europeiska länder utvecklas egna system (alternativt modifieras amerikanska system) för att kunna möta detta hot.

Ballistiska robotar kan generellt sägas ha låg träffnoggrannhet vilket begränsar användning som taktiskt vapen på det konventionella slagfältet. Deras stora potential är istället som terrorvapen. Det som gör hotet från ballistiska robotar särskilt allvarligt är möjligheten att försöka dem med massförstörelsevapen.

I Försvarsberedningens rapport "Säkrare grannskap - osäker värld" från 2003 belyses hotet från ballistiska robotar [1]:

"Ett ballistiskt missilsystem kan bedömas såsom attraktivt för många utvecklingsländer bl.a. för att ett sådant system är mer ekonomiskt att anskaffa och vidmakthålla jämfört med att bygga upp ett nationellt flygvapen. Har landet ifråga även tillgång till kompetens inom området massförstörelsevapen kan hot och även påverkansmöjligheter göras mer trovärdiga vid konflikter på såväl regional som internationell nivå. Kan kontinentala Nordamerika inte nås, kan det inte uteslutas att hotet vänds mot Europas huvudstäder eller mot europeiska eller amerikanska förband som deltar i "lämplig" internationell insatsstyrka."

I Sverige började studier av försvar mot ballistiska robotar på allvar under 1990-talet. FOI har gett ut tre översiktliga rapporter: "Skydd mot ballistiska robotar" från 1995 [2], "Luftvärnsskydd mot kryssningsrobotar och ballistiska robotar med begränsad räckvidd (TSA-LV)" från 1998 [3] och "Inledande studie av möjligheterna att bekämpa stridsdelar till ballistiska robotar" från 2002 [4]. I den nu pågående försvarsmaktsstudien "Målbild Lv 2014" (ATK 02069S) aktualiseras denna fråga ytterligare.

Vapensystem som skall klara att bekämpa ballistiska robotar blir tekniskt mycket avancerade. Ballistiska robotar håller hög hastighet, har en liten radarmålarea och stridsdelarna kan göras mycket robusta.

För att kunna värdera verkan i ballistiska robotar måste nya typer av fenomen och förlopp studeras som inte förekommer vid värdering av mer ordinära system. Det som främst skiljer är höga hastigheter, speciella typer av hotstridsdelar samt nya typer av bekämpningsvapen.

I denna rapport görs en inledande studie av värdering av verkan i ballistiska robotar. Fokus ligger på slutfasen av bekämpningen, dvs. interaktionen mellan bekämpningsvapen och mål och då främst robotar utrustade med BC-stridsdelar.

Kryssningsmissiler brukar också falla inom kategorin nya och svårbekämpade hot. Dessa kommer inte att avhandlas i denna rapport, men framtida värderingar är tänkbara. I verkansvärderingsavseende kan det nämnas att kryssningsmissiler i stort påminner om konventionella flygmål, vilket i stor utsträckning underlättar värdering.

2 Syfte och inriktning

Syftet med denna rapport är att belysa de fenomen och förlopp som gör ballistiska robotar till särskilt svåra mål ur bekämpningssynpunkt. Rapporten syftar också till att redovisa kunskapsläget för möjligheterna att värdera verkan i ballistiska robotar samt att identifiera de områden där kunskapsinhämtning/uppbyggnad är nödvändig.

Det som främst försvårar värdering av verkan i ballistiska robotar är de höga relativa hastigheterna mellan vapen och mål samt de ofta unika utformningarna på både mål och bekämpningsvapen.

Rapporten inleds med att ge en översiktlig beskrivning av ballistiska robotar, olika typer av stridsdelar samt system för bekämpning. Beskrivningarna syftar till att klarlägga relevanta faktorer ur verkanssynpunkt. De höga hastigheternas inflytande på penetrationsförloppet beskrivs tillsammans med en diskussion om dess inverkan på bekämpningsmöjligheten.

Två typer av beräkningar/simuleringar har genomförts. Simuleringar med värderingsverktyget AVAL syftar till att belysa hur de höga hastigheterna påverkar möjligheten att träffa ett mål med splitter. Det kontinuummekaniska beräkningsprogrammet AUTODYN har använts för att belysa hur olika typer av BC-behållare påverkas då de träffas av olika typer av projektiler.

3 Ballistiska robotar

Med en ballistisk robot menas en raketdriven robot som har någon typ av styrning och som under största delen av sin bana följer en kastparabel mot sitt mål. Ballistiska robotar är framförallt avsedda för att bekämpa markmål.

Ballistiska robotar delas oftast in i klasser utifrån sin maximala räckvidd. Följande uppdelning är den mest vanligt förekommande:

Kategori	Räckvidd	Svensk benämning*
SRBM (Short-Range Ballistic Missile)	< 1000 km	Kortdistansrobot
MRBM (Medium-Range Ballistic Missile)	1000-3000 km	Medeldistansrobot
IRBM (Intermediate-Range Ballistic Missile)	3000-5000 km	Interregional robot
ICBM (Intercontinental Ballistic Missile)	>5500 km	Interkontinental robot

* Svensk nomenklatur är inte lika vedertagen

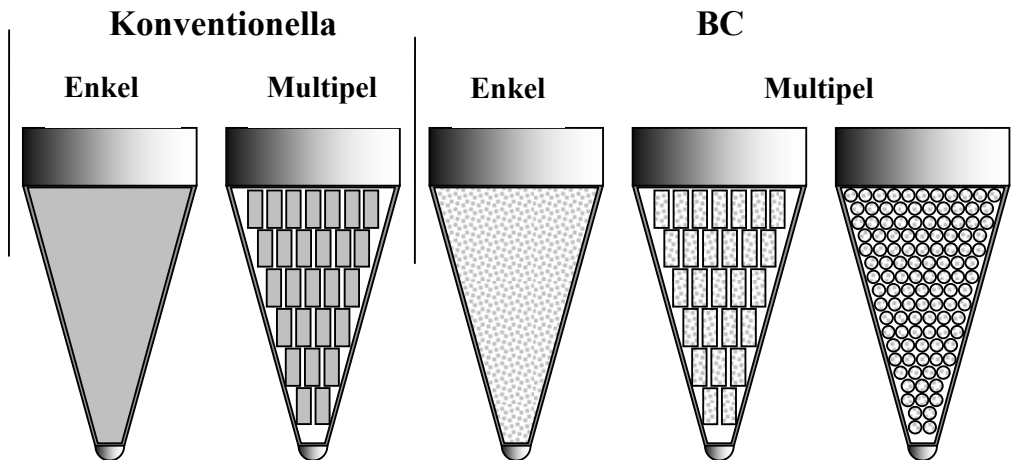
SRBM, men även MRBM, består oftast av ett raketsteg med en stridsdel monterad i toppen. Vanligast är att stridsdelen separerar från resten av raketten när raketsteget har brunnit ut. Andra lösningar förekommer också, de irakiska Al-Hussein (modifierade Scudmissiler) som användes i Gulfkriget är ett exempel på en robot som inte har en separerande stridsdel. Långräckviddiga robotar består ofta av två eller flera raketsteg. På samma sätt som vid vanliga rymduppskjutningar separerar raketstegen från resten av roboten när de är utbrunna för att på så sätt minska mängden onödig vikt som behöver accelereras. Kärnvapenbärande ICBM kan innehålla flera stridsdelar som är individuellt styrbara, på engelska benämnda MIRV (Multiple Independently targetable Reentry Vehicles). Exempel på dessa är ryska SS-19 Mod 3 med sex MIRV [5] och amerikanska Peacemaker med tio MIRV [6]. ICBM med MIRV förbjöds i START II avtalet och om det ratificeras ska alla MIRV på ICBM i USA och Ryssland vara ersatta med enkelstridsdelar senast 2007.

Robotbanan delas ofta in i tre faser benämnda drivfas, banfas och återinträdesfas (engelsk benämning: boost phase, midcourse phase och terminal phase). Drivfasen pågår från det att roboten avfyras till dess att bränslet i raketten/raketerna är utbrunnet. Roboten flyger sen i en ballistisk bana mot målet. Banfasen pågår fram till dess att stridsdelen återinträder i den täta jordatmosfären (30 km höjd). Under återinträdesfasen utsätts stridsdelen för kraftig aerodynamisk bromsning vid fallet genom atmosfären mot marken. Robotar med räckvidder under ca 300 km lämnar inte den täta jordatmosfären [7] och utsätts därför inte för lika abrupta påkänningar som robotar med större räckvidd.

Det är främst under drivfasen som robotens bana korrigeras, styrning kan ske genom vridbara dysor, roder, vingar eller liknande. Moderna stridsdelsbärare kan även tänkas vara utrustade med impulsraketer och på så sätt korrigerar raketbanan även under banfasen. Under återinträdesfasen kan även små förändringar av banan göras genom att utnyttja fenor eller liknande och på så sätt styra stridsdelen aerodynamiskt. Om den återinträdande stridsdelen håller hög hastighet försvåras möjligheterna för styrning men genom att bromsa stridsdelen blir det möjligt att göra större justeringar av banan. Stridsdelsbäraren på långräckviddiga ballistiska robotar är ofta försedd med en mindre raketmotor som används för att styra stridsdelsbäraren efter att raketstegen har brunnit ut, på engelska benämnd PBV (Post-Boost Vehicle). På detta sätt kan precisionen ökas för robotar med enkelstridsdelar. För robotar med MIRV används den styrbara stridsdelsbäraren för att placera ut stridsdelarna i olika banor och på så sätt kan stridsdelarna riktas mot multipla mål separerade med stora avstånd.

3.1 Stridsdelar

En ballistisk robot kan förses med konventionella stridsdelar eller NBC-stridsdelar. Förutom efter verkansform kan stridsdelarna delas in i huvudgrupperna enkelstridsdelar respektive multipelstridsdelar. I Figur 1 redovisas några exempel på olika stridsdelstyper.



Figur 1: Exempel på typer av stridsdelar

Mindre korsträckviddiga robotar kan ha stridsdelsvikter på typiskt mellan 0,5 och 1 ton medan ICBM kan ha stridsdelsvikter på flera ton. Bottendiametern på stridsdelarna är från någon meter för korsträckviddiga robotar och upp till flera meter för ICBM.

3.1.1 Konventionella stridsdelar

En konventionell enkelstridsdel består av ett sprängämnesfyllt metallhölje och någon typ av anslags- eller zornrör. Robotar med låg precision kan generellt anses ha begränsad verkan mot militära mål och fungerar därför främst som ett terrorvapen mot civilbefolkning (t.ex. de tyska V-2 robotarna under andra världskriget samt de irakiska Al-Hussein robotarna under Gulfkriget). Tryckverkan från sprängladdningen ger lokalt hög verkan mot byggnader och liknande som riskerar att rasa. Om roboten har hög precision kan den potentiellt även utgöra ett hot mot fortifikatoriska anläggningar och andra hårda mål.

För att uppnå högre ytverkan med en konventionell stridsdel kan den ballistiska roboten förses med en multipelstridsdel. Substridsdelarna kan vara utformade som splitterstridsdelar för verkan mot trupp eller med RSV-stridsdelar för verkan mot bepansrade fordon. En multipelstridsdel kan genom det större verkansområdet erbjuda ett större hot mot militära mål jämfört med motsvarande enkelstridsdel. Konventionella multipelstridsdelar kan även fungera som terrorvapen; hundratals splittersubstridsdelar som med hög hastighet slår ner över en stad har potential att orsaka omfattande skador, dels direkta från detonation och splitter men även indirekta från bränder och hus som rasar.

3.1.2 C-stridsdelar

Ett kemiskt vapen (C-vapen) är ett vapen som använder de giftiga egenskaperna hos en substans för att orsaka verkan på människor, djur eller växter. Kemiska vapen kan användas för att omedelbart döda och terrorisera inom ett område men även för att kontaminera ett begränsat område för att på så sätt försvåra rörlighet och verksamhet i området. Effekterna av en kemisk stridsdel beror i stor utsträckning på vilken agens som används, hur spridningen går till och var spridningen sker. Vi kommer inte i denna rapport diskutera dessa faktorer i detalj, utan de kommer endast att beröras ytligt för att kunna dra slutsatser om utformning på kemiska stridsdelar.

Historiskt sett har C-stridsmedel framför allt anpassats för användning i samma vapen och vapenbärare som används för konventionell strid. Även ballistiska robotar utrustas med C-stridsdelar, både av enkel- och multipeltyp. De vanligaste C-stridsmedlen är i vätskeform vid rumstemperatur (t.ex. senapsgas, sarin och VX) och för att kunna uppnå ytverkan krävs att det kemiska ämnet sprids på något sätt. Lättflyktiga

ämnen som sarin sprids i aerosolform och verkar genom inandning. Mer svårflyktiga ämnen som senapsgas och VX kan spridas i aerosolform men även som små droppar för att verka genom direktkontakt med huden eller som markbeläggning. Det lättaste sättet att sprida ett stridsmedel är att spränga ut det, ju mer sprängämne som används desto mer finfördelat bli stridsmedlet. Detonationen riskerar dock att förstöra stora delar av stridsmedlet. Stridsmedel som kan antändas, t.ex. VX, kan inte spridas genom att spränga ut dem [8]. Ickeexplosiv spridning kan ske genom att släppa ut ämnet och låta fartvinden finfördela stridsmedlet men även genom mer sofistikerade sprayningsanordningar där droppstorleken noggrant kontrolleras.

En kemisk enkelstridsdel kan lite förenklat beskrivas som bestående av en behållare med agens, ett tändsystem och någon typ av utspridningsanordning. Ett känt exempel är enkelstridsdelarna som Irak utvecklade till sina Al-Hussein robotar. Utspridning av C-stridsmedel från en ballistisk robot med enkelstridsdel är svår att genomföra på ett effektivt sätt. Den ballistiska banan och den höga hastigheten begränsar möjligheten att sprida medlet på ett kontrollerat sätt på rätt höjd. Den höga värmeutvecklingen vid de höga hastigheterna riskerar även att förstöra stora delar av stridsmedlet. De enklaste metoderna för utspridning från en enkelstridsdel är att spränga ut agensen eller att öppna höljet och låta agensen finfördelas av den inströmmade luften.

För att få en jämnare och mer kontrollerad spridning över ett större område kan multipelstridsdelar användas. Storlek och utseende på substridsdelarna varierar, sfäriska, cylindriska men även andra former är tänkbara. I stridsdelbäraren är substridsdelarna packade så optimalt som möjligt ur volym- och spridningshänseende. Stridsmedlet kan spridas från substridsdelarna på liknande sätt som för enkelstridsdelen men även genom att spraya ut det under färden mot marken. Särskilt effektivt blir detta om substridsdelen bromsas t.ex. genom att förses med fallskärm.

3.1.3 B-stridsdelar

Biologiska vapen (B-vapen) utgörs främst av mikroorganismer (virus, bakterier och svampar) som kan orsaka sjukdom och död. Per viktsenhet är B-stridsmedel oerhört effektiva eftersom ett B-stridsmedel (till skillnad från C-stridsmedel) kan föröka sig, varför endast en liten mängd krävs för att åstadkomma ett insjuknande. Till skillnad mot C-stridsmedel, där verkan normalt sker närmast momentant, krävs en viss inkubationstid (timmar till veckor) innan effekterna av ett B-stridsmedel märks. Det finns en rad olika typer av tänkbara B-stridsmedel och vi kommer i denna rapport endast diskutera några ytligt för att på så sätt kunna dra slutsatser om utformning på B-stridsdelar.

B-stridsmedel sprids främst som våt eller torr aerosol, där storleken på aerosolpartiklarna anpassas för att kunna tas upp vid inandning. Stridsdelar för aerosolgenerering av B-stridsmedel bygger på främst två principer, nämligen genom explosion eller med någon typ av sprayteknik. Med explosion sker spridningen omedelbart men tryck och värme kan förstöra en stor del av stridsmedlet samtidigt som aerosolpartiklarnas storleksfördelning inte blir optimal [7]. Sprayteknik är skonsammare för mikroorganismerna och partikelstorleken kan noggrannare kontrolleras, men processen är betydligt mer tidskrävande.

Av tänkbara B-stridsmedel anses antraxsporer inneha en unik position som urtyp för biologisk krigsföring. Antraxsporer har mycket hög överlevnad både vid utspridning och som aerosol i luften. Sporererna har förmåga att överleva explosiv spridning [7] vilket möjliggör användning i en ballistisk robot som håller en relativt hög hastighet.

Både enkel- och multipelstridsdelar för B-stridsmedel utformas i princip på samma sätt som C-stridsdelar. B-stridsmedlen kan dock generellt sägas vara betydligt känsligare för temperaturförändringar och mekanisk påverkan vilket leder till mer komplicerad utformning på stridsdel. Som stridsdel till en ballistisk robot kan nog substridsdelar, som sprayar ut stridsmedlet på sin väg mot marken, anses vara det alvarligaste hotet då en effektiv spridning erhålls.

3.1.4 N-stridsdelar

När ett kärnvapen exploderar (dvs. energin i det klyvbart materialet utnyttjas till ett snabbt och kraftigt explosionsförlopp) bildas en stötvåg samt en värme- och ljuspuls [9]. Det är samma fenomen som uppkommer vid vanliga explosioner men i detta fall är de mycket långvarigare beroende på det stora energiinnehållet. Vid explosioner i luften ger en liten del av energin även upphov till en elektromagnetisk puls (EMP), som kan skada elektroniska komponenter. Dagens tekniska civila samhälle är mycket sårbart för EMP, medan militära plattformar och system är mer motståndskraftiga och sedan många år byggs med EMP-skydd.

Kärnladdningar kan göras kompakta och robusta [4]. De kan tåla att skjutas iväg med artilleripjäser (155 mm) och penetrera bunkrar innan de initieras. Flygplansburna kärnvapen designas ofta för att tåla att tappas från flygplan utan att initieras. Stridsdelar och styrsystem i ballistiska robotar med kärnvapen är normalt även hårdgjorda för att tåla strålning från andra kärnladdningar. Eftersom att laddningarna kan göras (relativt) små och trots det ge stor verkan kan en förhållandevis stor del av vikten läggas på att skydda laddningen.

Kärnvapenbestyckade ballistiska robotar kan bestå av en eller flera stridsdelar. Exempel på detta är de sovjetiska RT-23 och UR-500 (NATO beteckning SS-24 SCALPEL resp. PROTON). RT-23 har 10 individuellt styrbara stridsdelar (MRIV) [10] medan UR-500 har en stridsdel [11].

Radiologiska vapen (R-vapen) används för att sprida radioaktivt material och därmed ”smutsa ner” målområdet. De radiologiska vapnen kan t.ex. bestå av restprodukter från en civil fissionsreaktor eller av material från civila strålkällor. Radiologiska vapen ställer inte stora krav på utformning och deras huvudsakliga användning är som ett terrorvapen.

3.2 Återinträde

När en långgräckviddig ballistisk robot återinträder i atmosfären sker en våldsam aerodynamisk upphettning av dess yta. För att skydda det inre av roboten mot alltför kraftig uppvärmning kläs utsidan med någon typ av värmeskyddsmaterial, ofta benämnt TPS (Thermal Protection System). Värmeskyddade stridsdelar brukar på engelska benämnas Reentry Vehicles (RV).

Historiskt sett har två metoder använts för att skydda objekt som återinträder i atmosfären mot upphettning, dels genom att klä objektet med ett material som förhindrar upphettning genom avsmältning (eng. *ablation*) och dels genom att klä objektet med värmesköldar konstruerade av avancerade kerambaserade material som isolerar objektet (eng. *radiative heat shield*). Avsmältning fungerar genom att skyddsmaterialet gradvis smälter och förångas vid uppvärmning och på detta sätt förbrukas värmeenergi. Material som används kan vara relativt avancerad, t.ex. av keramtyp, men även mer lättåtkomliga material t.ex. glasfiber. Naturligt förekommande material förekommer också, det kan nämnas att på det kinesiska återinträdesfordonet FSW användes ek som skyddsmaterial [12].

Genom att använda en trubbig nosform så bromsas stridsdelen snabbt och därmed ställs betydligt lägre krav på värmeskyddsmaterialet [7]. Bemannade rymdkapslar brukar vara trubbiga, främst för att bromsa hastigheten inför landning men även för att minska upphettningen. När stridsdelen bromsas försämras precisionen eftersom stridsdelen till viss del glidflyger samtidigt som den kan påverkas av vindar. Den stora fördelen med en stridsdel som bromsas är att kraven på avancerade värmeskyddsmaterial minskar och det är därför en trolig lösning för ett land med ett relativt nyutvecklat robotprogram.

Avancerade stridsdelar konstrueras spetsiga för att inte bromsas för att på så sätt uppnå bättre precision. Som värmeskydd används avancerade värmesköldar då värmeskydd genom avsmältning riskerar att försämra precisionen.

4 Vapen mot ballistiska robotar

Försvarssystem mot ballistiska robotar benämns vanligtvis ABM-system (Anti Ballistic Missile). Systemen brukar delas in i kategorier utifrån när i hotrobotens bana som vapnet verkar. Vapen som verkar mot ballistiska robotar under uppskjutningen går vanligtvis under den amerikanska benämningen Boost Phase Defense. Midcourse Defense är benämningen på system som ska bekämpa robotar i banfasen. Robotsystem för bekämpning av ballistiska robotar i slutfasen (Terminal Phase Defense) delas i USA in i kategorierna höghöjds- och låghöjdsvapen (upper tier och lower tier) utifrån bekämpningshöjd samt räckvidd.

4.1 Boost Phase Defense

Det finns flera fördelar med att ha system som verkar mot ballistiska robotar när de befinner sig i drivfasen. Kraven på vapen för bekämpning är betydligt lägre eftersom roboten har lägre hastighet och betydligt större målyta innan stridsdelsbäraren separerat från övriga raketsteg samtidigt som de heta gaserna från det brinnande raketbränslet skapar gynnsamma förutsättningar för detektering och målsökning.

Ballistiska robotar kan utrustas med skenmål eller substridsdelar som återinträder individuellt. Vid en bekämpning tidigt i robotens bana undviks denna typ av bekämpningsförsvarande åtgärder. Men den främsta orsaken till att bekämpa i drivfasen är att om den ballistiska roboten är utrustad med någon typ av NBC-stridsdel så kommer resterna från stridsdelen att falla ner över angriparens territorium istället för över försvararens.

Problemet med Boost Phase försvar är att det från detektion och klassificering av en robotavfyrning krävs en kort reaktionstid samtidigt som systemet måste vara fysiskt närvarande för att kunna slå ut roboten över angriparens territorium. Detta kan ske genom flygburna alternativt rymdbaserade strålvapen. Ett exempel på detta är amerikanska Airborne laser, en Boeing 747 som utrustas med en kraftig laser. Lasern ska belysa den avfyrande roboten och höjer temperaturen i materialet vilket i sin tur minskar hållfastheten så att roboten kollapsar under krafterna från accelerationen. UAV:er (Unmanned Aerial Vehicle), försedda med robotar, som befinner sig i närheten av potentiella avfyrningsplatser är också tänkbara alternativ.

Med rätt fysisk placering kan potentiellt även mark- eller sjöbaserade robotsystem användas för bekämpning av ballistiska robotar under uppskjutningsfasen.

4.2 Midcourse Defense

Banfasen pågår från det att startraketerna har brunnit ut (och ev. frikopplats från stridsdelsbäraren) fram till återinträdet i atmosfären. För långräckviddiga robotar kan banfasen pågå i upp till 25 minuter [13]. Vapen för bekämpning i detta segment är främst avsedda mot långräckviddiga robotar där den relativt långa tiden som den ballistiska roboten befinner sig i utomatmosfärisk bana är en fördel. Detta ger tid att upptäcka, klassificera, besluta och sätta in motmedel. Jämfört med Boost Phase vapen så kan systemen placeras långt från tänkbara uppskjutningsplatser och på så sätt potentiellt minska sårbarheten hos systemet. En bekämpning utanför atmosfären medför att rester från sönderslagna NBC-stridsdelar brinner upp eller förångas vid återinträdet i atmosfären. Detta är bra för försvarandet av målområdet men ge globala konsekvenser.

System av detta slag kräver stora resurser, målen ska detekteras och följas utanför atmosfären vilket antagligen kräver någon typ av rymdbaserat sensorsystem. Stridsdelen som används för bekämpning måste placeras i bana utanför atmosfären och där genskjuta roboten vilket ställer stora krav på räckvidd och precision.

Vapen som bekämpar robotar under banfasen kan var känsliga för olika typer av motmedel. I [14] utreds tänkbara sådana. Motmedlen kan vara i form av skenmål, t.ex. ballonger som släpps från roboten.

Ballongerna kan ha samma storlek och utseende som roboten och eftersom det råder nästan vakuum i det yttre gränsskiktet av atmosfären kommer robot och ballonger kunna hålla samma hastighet trots ballongernas lägre vikt. En besvärande åtgärd som även försvårar bekämpningsmöjligheterna i slutfasen är att sprida ut substridsdelar på ett tidigt stadium i banfasen. Om varje substridsdel utrustas med värmesköld kan dessa följa individuella banor och återinträda individuellt.

Två amerikanska system som nu studeras för banfasbekämpning av ballistiska robotar är ett landbaserat GMD (Ground-Based Midcourse Defense) och ett fartygsbaserat SMD (Sea-Based Midcourse Defense). Nedan ges en kort beskrivning av systemen.

4.2.1 GMD (Ground-Based Midcourse Defense)

Hela systemet är tänkt att bestå av rymdbaserade sensorer samt markbaserad radar för detektering och spårning av inkommande robotar. Vapnet i GMD betecknas GBI (Ground Based Interceptor) och består av en landbaserad bärraket som placerar en EKV (Exo-Atmospheric Kill Vehicle) i utomatmosfärisk bana mot roboten. EKV verkar genom att direktträffa roboten. De höga relativa hastigheterna medför att energin i kollisionen är tillräckligt stor för att förstöra det inkommande hotet.

En GBI får uppdaterad information om målets läge under flygtiden och därmed kan dess egna sensorer identifiera och låsa på målet. EKV:n är försedd med små raketmotorer som används för att korrigera kursen så att kollisionen verkligen inträffar. Som bärraket används i dagsläget andra och tredje raketsteget från en Minuteman II. Minuteman III diskuteras som möjlig kandidat som bärraket i det slutliga systemet [15].

4.2.2 SMD (Sea-Based Midcourse Defense)

Systemet går även under benämningen Navy Theater Wide (NTW) och är tänkt att användas på fartyg av Aegis-klassen. Systemet är avsett för bekämpning av ballistiska robotar i början av banfasen vilket gör systemet mindre sårbart för motmedel [16]. Vapnet i SMD är en modifierad Standard Missile-2 Block IV som benämns SM-3. Roboten har försetts med ett tredje raketsteg och en KE-stridsdel som benämns LEAP (Lightweight Exo-Atmospheric Projectile). Även detta system verkar genom direktträff.

4.3 Terminal Phase Defense

Slutfasen pågår från det att den ballistiska roboten kommer in i atmosfären till dess att den slår ner i marken. För långräckviddiga robotar varar slutfasen i mellan en och två minuter [17]. System för bekämpning i slutfasen påminner i stor utsträckning om vanliga luftvärnssystem och är betydligt mindre resurs- och kostnadskrävande än system för bekämpning i driv- och banfas. Systemen stationeras i närheten av området som ska försvaras och ställer därför inte samma krav på globala system för upptäckt och bekämpning. En annan fördel med bekämpning i slutfasen är att skenmål och liknande relativt lätt kan separeras från stridsdelen eftersom luftmotståndet vid återinträdet i atmosfären bromsar lätta skenmål snabbare än den relativt tunga stridsdelen.

Stridsdelens höga hastighet medför att tidsförloppet blir kort. Från att målet upptäcks måste beslut om bekämpning fattas mycket hastigt varför i princip helautomatiska system krävs. Man-in-the-loop system är därför endast möjligt i undantagsfall.

Stridsdelen kan potentiellt konstrueras så att den manövrerar, med flit eller oavsiktligt, vilket försvårar möjligheten för bekämpning avsevärt. Ett exempel på oavsiktlig konstruktion av manövrerande stridsdel är de Irakiska Al-Husseini robotarna som avfyra under Gulfkriget. Robotarna bröts sönder vid återinträdet i atmosfären vilket resulterade i att stridsdelen började tumla på sin väg mot marken. Detta berodde antagligen på konstruktionsmissar när de befintliga Scud-missilerna modifierades för att uppnå längre räckvidder, precisionen minskades avsevärt men det försvårade också möjligheterna för de runt Persiska viken stationerade Patriotsystemen att bekämpa dem.

Även vid en framgångsrik bekämpning så kan rester från en eventuell NBC-stridsdel falla ner över området som försvaras. Om den ballistiska roboten är försedd med en BC-stridsdel är det av stor vikt att

ta hänsyn till detta eftersom ett dåligt bekämpningsförsök potentiellt kan riskera att förvärra resteffekterna från stridsmedlet.

I USA delas system för bekämpning av ballistiska robotar i slutfasen in i höghöjds- och låghöjdsystem (Upper-Tier och Lower-Tier Systems). Indelningen är baserad på bekämpningshöjden där höghöjdsystemen är tänkta att verka på en höjd över 40 km och låghöjdsystemen på en höjd under 40 km. I USA pågår utvecklingen av det landbaserade höghöjdsystemet THAAD (Theater High Altitude Area Defense) och en kortfattad beskrivning av systemet ges nedan. Det mest utvecklade låghöjdsystemet är det amerikanska Patriotsystemet och därför ges en ganska ingående beskrivning av detta system i nästföljande kapitel. Exempel på andra låghöjdsystem som är under utveckling är det amerikanska fartygsbaserade NAD (Navy Area Defense), det i samarbete mellan Israel och USA framtagna Arrow-systemet samt systemet MEADS som utvecklas i samarbete mellan ett antal europeiska länder och USA.

4.3.1 THAAD (Theater High Altitude Area Defense)

Utvecklingen av THAAD-systemet påbörjades under 1990-talet för att bekämpa ballistiska missiler strax utanför och precis innanför atmosfären. Systemet är konstruerat för att kunna bekämpa robotar på höjder från 40 km till 150 km [19].

THAAD-GBR (Ground Based Radar) har en räckvidd på 1000 km, en vidvinkel på 120 grader och kan inte roteras. Utskjutningen av THAAD-roboten sker från ett fordon med PLS (Palletized Loading System), vilket medför att omladdning ska kunna genomföras på 30 minuter. Systemet är ett två-steps system med en startraket och en robot som verkar genom direkträff och vars räckvidd uppgår till 250 km.

THAAD-robotens totala längd och vikt är 6.17 m resp. 600 kg, där verkansdelen är 2.32 m och har en diameter på 0.37 m [19]. Verkansdelen har en maxhastighet på 2.5 km/s och styrs med hjälp av 10 stycken styrraketer. Roboten förses kontinuerligt med aktuella data från GPS och THAAD-GBR kommandon, då träffpunkt och flygvägen uppdateras. I närheten av målet styrs verkansdelen med hjälp av en IR-sensor.

4.4 Patriot

Utvecklingen av luftvärnssystemet Patriot startades 1967 och benämndes ursprungligen XMIM 104A SAM-D (Surface-to-Air Missile Defense). De första testerna av systemet genomfördes i början på 70-talet och en fullskalig utveckling påbörjades 1976. I samband med detta ändrades namnet till MIM 104 Patriot. Avsikten med det ursprungliga systemet var att bekämpa flygplan och det fanns ingen ambition att även kunna bekämpa taktiska ballistiska robotar eftersom dessa ansågs ha så dålig precision att de endast innebar ett litet hot mot militära mål [18]. I slutet av 70-talet ändrades detta i och med att Sovjetunionen ökade precisionen på sina SS-1 (Scud) missiler. Patriotsystemet ansågs vara lämpligt för utveckling för att även klara detta hot och 1984 startades uppgraderingsprogrammet PAC-1 (Patriot Advanced Capability-1) [19]. Detta program innehöll uppgraderingar av mjukvaran; radarns sökmönster samt robotbanan modifierades. Flygförsök med PAC-1 genomfördes 1986 och dessa visade på behov av modifieringar av stridsdel och tändsystem för att roboten skulle få bättre verkan. I det andra uppgraderingsprogrammet, PAC-2, genomfördes dessa förändringar samt ytterligare uppgraderingar av mjukvaran. PAC-2 flygtestades första gången 1987 och användes mot Irakiska Scud-missiler under Gulfkriget 1990-91. 1994 inleddes PAC-3 programmet. Den största förändringen var att den befintliga Patriotroboten byttes ut mot den betydligt mindre ERINT (Extended Range INTerceptor) roboten. Roboten har sitt ursprung i ett program som startades i början på 80-talet för bekämpning av ballistiska robotar på höjder över 15 km [20]. PAC-3 (ERINT) missilen är integrerad i PAC-2 systemet och avfyras från modifierade Patriotavfyringsenheter. PAC-3 systemet har testats mot åtta simulerade ballistiska robotar, sju av försöken anses vara lyckade [19].

4.4.1 Patriotsystemet

Patriotsystemet består av en fastyrd radar, en eldledningsenhet (Engagement Control Station) och 6-8 avfyringsenheter (Launcher Station). En avfyringsenhet kan innehålla antingen fyra PAC-2 robotar eller åtta PAC-3 robotar [21].

4.4.2 PAC-2 roboten

Robotens längd är 5,2 m, dess diameter är 0,41 m och avfyringsvikten är 914 kg. Maxhastigheten är ca 1700 m/s (mach 5), räckvidden är ca 70 km vid bekämpning av flygplan och ca 20 km för ballistiska robotar. Den maximala höjden uppskattas till 24 km.

När en robot avfyras överförs information från eldledningsenheten om var roboten ska leta efter målet. Väl i luften så följer markradarn roboten samtidigt som styrinstruktioner skickas till roboten från eldledningsenheten. På ett förbestämt avstånd aktiveras även robotens semiaktiva radarmottagare och denna information skickas tillbaka till eldledningsenheten för att understödja detekteringen av det verkliga målet. Eldledningsenheten beräknar ny bana och roboten styrs sen mot målet. Ett zonströr används sedan för att detonera splitterstridsdelen.

Zonströret (M818 E2) är av pulsad Dopplertyp med två koniska strålar, en med liten strålbredd för ballistiska robotar och med stor strålbredd för långsammare mål. Totalt väger stridsdelen ca 90 kg. Sprängämnet i stridsdelen är Oktol 75/25 och upptar ungefär halva stridsdelsvikten. Höljet består av förfragmenterat härdat stål och bildar vid detonation ca 1000 splitter som väger ca 45 g styck [18,20].

4.4.3 PAC-3 roboten

Robotens längd är 5,2 m, robotkroppens diameter är 0,26 m och avfyringsvikten är 315 kg. Maxhastigheten anges till ca 1700 m/s (mach 5) [22], räckvidden till 20 km och den maximala bekämpningshöjden till 15 km. PAC-3 verkar främst genom att direktträffa målet (hit-to-kill). Missilen är även utrustad med en liten stridsdel, en så kallad verkansförbättrare (lethality enhancer), som används för att öka verkan i mål med luftförbrukande motorer, t.ex. flygplan och kryssningsmissiler.

När en PAC-3 robot avfyras överförs målinformation från eldgivningsenheten till roboten. När roboten är i luften är den i kontakt med eldgivningsenheten och robotbanan kan därför uppdateras om det är nödvändigt. Under de två sista sekunderna av flygningen så aktiveras robotens 35 GHz Dopplerradar för att styra roboten till målet. Radarn fungerar även som tändsystem till stridsdelen. Roboten styrs dels med hjälp av fyra rörliga aerodynamiska kontrolltytor placerade längst ner på roboten, samt av 180 små impulsrakettmotorer monterade i den främre delen av roboten.

När roboten träffar målet väger den ca 140 kg, detta i kombination med de höga relativa hastigheterna medför att roboten vid en direktträff har en stor mängd rörelseenergi att deponera i målet. Den verkansförbättrande stridsdelen består av 0.33 kg sprängämne. Runt stridsdelen ligger två ringar med tolv fragment i varje ring. Fragmenten är av stål och väger 95 g styck. När stridsdelen detonerar expanderar de två ringarna långsamt och med olika hastigheter ut från missilkroppen. På detta sätt ökas missilens verkansyta. Den verkansförbättrande stridsdelen används inte mot ballistiska robotar [21].

4.4.4 Patriotsystemet i Gulfkriget

Patriotsystemet är det enda system som använts för att bekämpa ballistiska robotar i skarpt läge. Nedan ges därför en kort genomgång av hur systemet användes i Gulfkriget.

Den 17 januari 1991, några timmar efter att koalitionsstyrkorna påbörjat luftattacker mot Irak, avfyrar Irak sju Scudmissiler mot Israel och en mot Saudi-Arabien. När detta händer finns över 400 PAC-2 robotar utplacerade runt om i Persiska viken. På en presskonferens på morgonen meddelar General Norman Schwarzkopf att den missil som avfyrades mot Saudi-Arabien framgångsrikt bekämpats av en Patriotrobot. Dagarna efter dessa händelser transporterades ett antal Patriotenheter till Israel.

Det totala antalet Scudmissiler som Irak avfyra mot Israel och länder med koalitionsstrupper uppskattas till 88 [23]. PAC-2 robotar, totalt 158, avfyra mot 47 av Scudmissilerna [24]. Hur många av dessa 47 Scudmissiler som verkligen bekämpades är omdebatterat, se t.ex. [24], [25]. Uppgifter på andelen Scudmissiler som framgångsrikt bekämpades varierar från 61 till 0 procent. Utan att här närmare återge debatten kan nämnas att ett av de största problemen ligger i definitionen av en framgångsrik bekämpning. De mest självklara kriterierna borde vara att Scudmissilens stridsdel fås att detonera, alternativt att tändsystemet slås ut och att Scudmissilen därför inte detonerar när den slår i marken. Istället har ett betydligt mer diffust kriterium använts. En Scudmissil som vid nedslag inte orsakar någon omfattande skada på byggnader eller människor anses bekämpad om en patriotrobot har avfyrats i dess riktning, detta oavsett om Scudmissilen detonerar eller inte vid nedslag.

De Irakiska missilerna som avfyra var av typen Al-Hussein. Detta är en ombyggd Scud-B missil som är modifierad för att få längre räckvidd. Raketerna har förlängts för att rymma mer bränsle och stridsdelvikten har minskats. På detta sätt fördubblas räckvidden från ca 300 till ca 600 km [26]. Ombyggnaden hade konsekvenserna att den ökade räckvidden medförde att precisionen kraftigt försämrades samtidigt som raketerna blev ostabila och därför hade en benägenhet att brytas sönder vid återinträde i atmosfären. Denna sönderbrytning försämrade självklart precisionen ytterligare men den orsakade också stora problem för Patriotsystemet. Delarna från den sönderbrytna raketerna fungerade som skenmål, stridsdelen var aerodynamiskt instabil och föll därför i en oregelbunden bana samtidigt som den på grund av sin måttliga storlek fick en liten radarmålearea. Antagligen oavsiktligt hade Irak alltså konstruerat en mycket svårbekämpad ballistisk robot.

4.5 Verkansformer

De flesta planerade och befintliga vapen för bekämpning av ballistiska robotar verkar genom att deponera kinetisk energi i målet. I de flesta amerikanska system är vapnet konstruerat för att direktträffa målet. Vanliga splitterstridsdelar förekommer också på vissa ABM-vapen.

För att kunna direktträffa målets stridsdel ställs stora krav på bekämpningsvapnets prestanda, om det missar (eller träffar fel del av målet) har det ingen effekt. Med en splitterstridsdel ges möjligheten att träffa målet inom ett visst bomavstånd. Nackdelen med splitterstridsdelar är att en stor del av de splitter som sprängs ut går i riktningar bort från målet, dvs. även vid en relativt optimal brisadpunkt kommer endast en del av alla utkastade splitter träffa målet. En djupare analys av dessa båda alternativ sker i senare delar av rapporten.

Flera andra lösningar på verkansdelar som deponerar kinetisk energi är möjliga och utförliga beskrivningar på potentiella sådana finns i [27, 28]. Syftet är att träffa målet med en så stor del som möjligt av den tillgängliga verkansmassan samtidigt som ett visst utrymme för små bomavstånd ges. Lämplig form på projektilerna diskuteras i [4] och en diskussion görs även i kapitel 5. För att möjliggöra värdering av dessa mer okonventionella verkansdelar krävs fördjupade studier.

Andra tänkbara verkansformer är stöt- och tryckvågsverkan varvid ett sprängämne detoneras och de expanderande spränggaserna träffar målet. De höga hastigheterna (målets hastighet kan vara av samma storleksordning som de expanderande spränggasernas) samt att målen ofta är relativt robusta begränsar dock möjligheten för denna verkansform. Potentiellt kan tryckverkan användas för att styra den ballistiska roboten ur kurs. I dagsläget finns inget bra sätt att värdera verkan från tryck vid de hastigheter som här är aktuella.

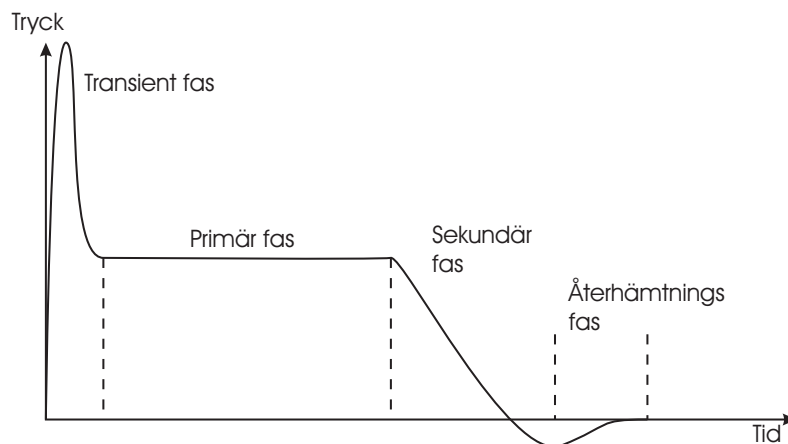
5 Höghastighetsperforation

Vid bekämpning av ballistiska robotar uppstår interaktioner mellan robot och motmedel i höga hastigheter, av storleksordningen 3-6 km/s. Vid dessa hastigheter uppträder annorlunda fysikaliska fenomen vid penetrations- och perforationsförlopp än vid lägre hastigheter.

Vid interaktion mellan en projektil och ett mål kan ett antal fall uppstå, dels *penetration* i målet, vilket innebär att projektilen tränger in i målet men inte igenom det, och dels *perforation*, då projektilen och medföljande utstött material kommer ut på baksidan av målet. För denna studie intressanta frågeställningar är då om projektilen tar sig igenom det yttre skyddet på en ballistisk robot, hur stort hålet blir och vilken effekten blir inuti roboten.

5.1 Penetrationsförloppet

Penetration utan perforation kan delas upp i fyra faser [29], enligt Figur 2. Den första fasen är den inledande interaktionen mellan målet och projektilen där stötvågen uppstår. Denna följs av primärfasen, vars längd beror av projektilens slankhetstal. Under denna fas fördjupas penetrationskanalen genom att projektil- och målmaterial i kontaktytan (mellan projektil och mål) kastas ut åt sidan under det att kontaktytan förflyttar sig in i målet. Projektilen ”konsumeras”. Sekundärfasen inträder när projektilen har slutat deformeras alternativt har konsumerats helt. Den slutliga återhämtningsfasen inträffar när penetrationen har upphört och materialet avlastas.



Figur 2. Tryckutveckling över tiden vid penetration

I [30] ges exempel på hur penetrationskanalens utseende och djup varierar med projektilgeometri (förhållandet mellan längd och diameter, L/D) och material (stål och tungmetall) i halvoändliga stålmål. För pilprojektiler ($L/D = 10$) av tungmetall finns delar av projektilen kvar i hålbotten vid hastigheter på 2,5 km/s medan stål projektilen var helt borteroderad vid denna hastighet.

Av [30] framgår också att slanka ($\sim L/D > 5$) projektilers penetrationsförmåga som funktion av hastigheten planar ut vid hastigheter över 2,5-3 km/s. Över denna hastighet går energin åt till att göra hålskanalen vidare istället för djupare vilket sker vid lägre hastigheter. Penetrationsförmågan för knubbiga projektiler ($L/D \approx 1$) ökar mer linjärt med hastigheten, åtminstone för hastigheter upp till ca 4 km/s. Hålskanalens form är här ungefär halvsfärisk istället för cylindrisk vilket gäller för slanka projektiler.

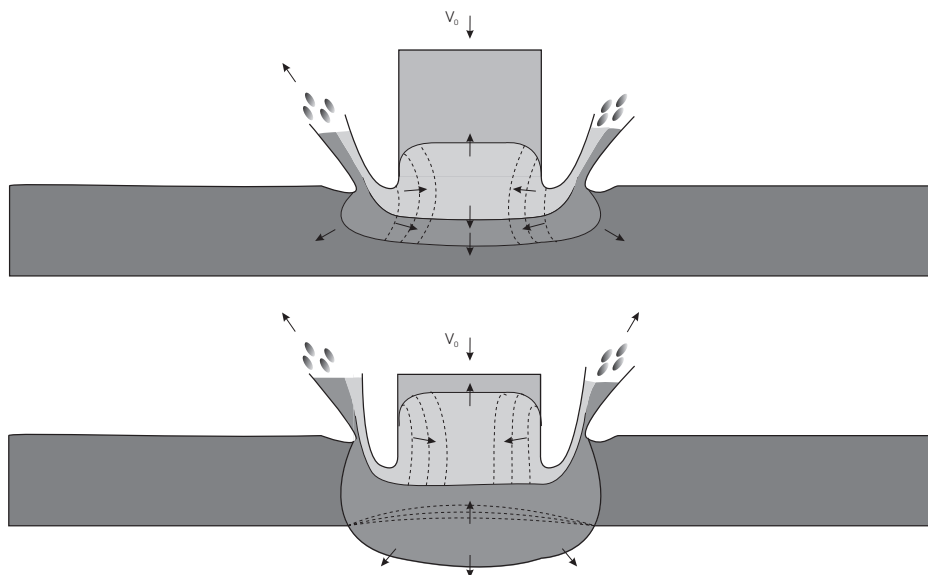
Om ett splitter eller en projektil inte perforerar det yttre skalet på en ballistisk robot är det rimligt att anta att det endast medför en begränsad skada. Nedan kommer därför fokus läggas på perforationsförloppet eftersom det är av större intresse att studera förloppet då det yttre skalet perforeras och verkan inuti den ballistiska roboten kan värderas.

5.2 Knubbiga projektilers penetration av tunna plåtar

Knubbiga projektilers penetrationsegenskaper i tunna plåtar är ett grundfall när det gäller bekämpning av stridsdelar (särskilt BC-stridsdelar) till ballistiska robotar med ABM-system försedda med splitterstridsdelar.

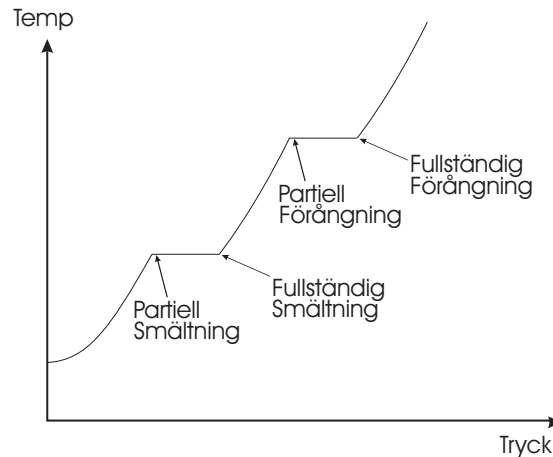
Beskrivningen av penetrationsförloppet gäller förutom för knubbiga projektiler även för spetsen på slanka projektiler. För fallet slank projektil fortsätter bakre delen av projektilen mer eller mindre opåverkad av nosens interaktion med plåten och restprojektilen kan sedan penetrera efterföljande målkomponenter som en sammanhållen kropp. En slank projektil kan således förenklat behandlas som ett antal knubbiga projektiler efter varandra. Hur förloppet går till är dock starkt beroende av hastighet, material och detaljer i projektilens och målets geometri.

I dessa höga hastigheter dominerar penetrationsförloppet för knubbiga projektiler i tunna plåtar av den stötvåg som fortplantar sig och reflekteras i projektil och målmaterial enligt Figur 3. Effekten av detta blir att materialet i mål och projektil deformeras/fragmenteras och kastas ut i ett moln på baksidan av målplåten.



Figur 3. Tryckvågseffekt vid perforation med extremt höga hastigheter.

Om hastigheten är tillräckligt hög, dvs. det dynamiska trycket är högre än hållfastheten hos projektilen eller målet, så kan materialet deformeras, smälta eller förångas [31, 32, 33]. Temperaturökningen sker enligt Figur 4 där energin går till smältning resp. förångning istället för ökad uppvärmning vid vissa temperaturer, vilka är unika för varje material.



Figur 4. Förhållandet mellan temperatur och tryck vid smältning och förångning

Anslagshastigheterna som krävs för att smältning ska inträffa ges i Tabell 1 för ett antal olika material [33]. Hastigheterna är beroende av vilket projektilmaterial som används.

Målmaterial	Stötvågens tryck [Mb]		Anslagshastighet [km/s]					
			Projektil av samma material som målet		Järnprojektil		Aluminiumprojektil	
			Partiell	Fulls.	Partiell	Fulls.	Partiell	Fulls.
Tallium	0.23	0.30	1.4	1.6	1.3	1.6	2.0	2.3
Bly	0.25	0.35	1.42	1.8	1.3	1.8	2.0	2.6
Tenn	0.22	0.35	1.56	2.2	1.3	2.0	1.8	2.8
Kadmium	0.33	0.46	1.90	2.4	1.8	2.3	2.5	3.2
Zink	0.50	0.70	2.72	3.4	2.5	3.2	3.5	4.5
Guld	1.46	2.15	2.88	3.7	3.8	4.9	6.0	7.8
Torium	0.74	0.86	3.1	3.4	3.1	3.4	4.4	4.9
Silver	0.98	1.27	3.22	3.8	3.4	4.1	5.1	6.1
Koppar	1.40	1.84	4.36	5.2	4.5	5.4	6.6	8.0
Uppskattade värden								
Volfram	3.4		4.9		6.5		10.3	
Nickel	2.3		5.8		6.1		9.0	
Molybden	2.7		6.0		6.6		9.8	
Kobolt	2.4		6.1		6.3		9.3	
Vanadin	1.8		6.6		6.1		8.7	
Krom	2.4		6.6		6.6		9.5	
Titan	1.3		6.8		5.6		7.6	
Ungefärliga värden								
Järn	1.8	2.1	5.4	6.0	5.4	6.0	7.9	8.8
Aluminium	0.7	1.0	5.6	7.0	4.3	5.3	5.6	7.0
Beryllium	1.5	1.9	11.4	13.1	8.2	9.4	10.5	12.0

Tabell 1: Anslagshastigheter där smältning uppstår

Anslagshastigheterna som krävs för att en aluminiumprojektil ska orsaka förångning hos några olika målmaterial visas i Tabell 2 [34].

Material	Anslagshastighet
Koppar	12.6 km/s
Aluminium	10.2 km/s
Kadmium	4.4 km/s
Bly	4.8 km/s

Tabell 2: Anslagshastigheter som orsakar förångning.

När projektilen perforerar en plåt kan alltså tre situationer uppstå bakom plåten beroende på hastighet och material i processen, dvs. deformation/fragmentering, smältning och förångning. Vid smältning/förångning kan den bakomliggande penetrationsförmågan försummas. Hänsyn bör dock tas till tryckvågen som uppkommer på baksidan samt temperaturökningen. Det är dock svårt att göra någon bedömning av vilken verkan dessa effekter skulle ha. Vid fragmentering, där en efterföljande splittersvärm och utstött material kan medföra vidare skada, kan dock effekten lättare kvantifieras med hjälp av t.ex. rörelsemängden.

5.3 Rörelsemängd hos restfragment

En beskrivning av rörelsemängden för utstött material och splittersvärm vid höghastighetsperforation kan delas in i fyra faser [35] efter projektilens initiala hastighet. Den första fasen inträffar när projektilen inte perforerar målet och inga utstötningar sker på baksidan. Den andra fasen inträder när en splittersvärm kastas ut på baksidan av målet. När splitter även genereras på framsidan av plåten, orsakade av tryckvågen i materialet, inträder den tredje fasen. Den fjärde fasen inträder när ingen rörelsemängd tas upp av plåten, dvs. vid perforation av tunna plåtar.

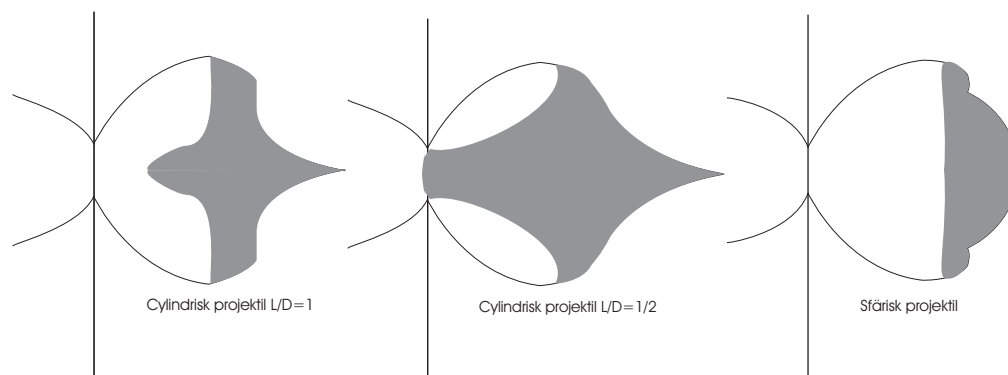
En studie där rörelsemängden från splittersvärm och utstött material mättes gav resultatet att rörelsemängden av splittersvärmen är högre än både det utstötta materialets och restprojektilen från mitten av andra fasen [35]. Det utstötta materialets rörelsemängd är i sin tur högre än projektilens rörelsemängd från och med mitten av den tredje fasen. Ur denna beskrivning kan även effekten hos målet fås då projektilen inte perforerar det.

Det bör noteras att det utstötta materialets rörelsemängd inte är försumbar för hastighetsintervallet av intresse (ca 3-6 km/s). Med anledning av detta bör även undersökningar med andra projektilformer än cylindrar vara av intresse för att bedöma effekten av rörelsemängden.

I samma studie gjordes försök med projektil och mål av aluminium där splittersvärmens rörelsemängd undersöktes med avseende på målplåtens tjocklek [35]. Projektilformen var sfärisk med konstant diameter. I hastighetsintervallet av intresse (ca 3-6 km/s) har denna kvot (måltjocklek/projektildiameter) stor betydelse för den slutliga rörelsemängden, där tunnare plåtar ger högre rörelsemängd än tjockare, vid samma hastighet. Vid högre hastigheter tenderar resultatet att bli det omvända. För att få maximala bakomliggande effekter har ett antal olika parametrar studerats i litteraturen, däribland projektilformen samt materialegenskaper hos mål och projektil.

5.4 Inverkan av projektilform

Projektilformens inverkan har undersökts med sfärisk projektil och cylindriska projektiler med olika L/D (1/2, 1, 3/2) [36]. Då aluminium användes som projektilmaterial i 7 km/s gav de cylindriska projektilerna en splittersvärm som var mer koncentrerad kring centrumlinjen än den sfäriska, se Figur 5.



Figur 5. Formen på splittersvärmen efter perforation med cylindrisk resp. sfärisk projektil.

Materian blir mer koncentrerad till den främre delen av splittersvärmen för större L/D. Då splittersvärmens massa är mer spridd med den sfäriska projektilen är denna mindre effektiv än den cylindriska projektilen vid vidare perforation. Detta är intressant vid bekämpning av ballistiska robotar då det är de eventuellt inre behållarna som ska förstöras. I samma studie gjordes även försök där massan hos den cylindriska projektilen varierades genom att dels skala ner projektilen och dels genom att hålla diametern konstant och minska längden.

Resultaten från de skalade experimenten med $L/D=1/2$ visade att den bakomliggande effekten var större för den cylindriska än för den sfäriska projektilen, för massor motsvarande $1/3$ av den sfäriska. Hastigheten hos fronten på splittersvärmen från den cylindriska projektilen visade sig vara 6 % större än hos den ursprungliga projektilen, vilket beror på att tryckvågen kunde förflytta sig genom plåten utan att försvagas av reflekterande vågor. En motsvarande ökning av hastigheten hos splittersvärmen med den sfäriska projektilen kunde dock inte observeras.

Experimenten där projektildiametern hölls konstant och längden minskades visade sig ge mer viktseffektiva projektiler än både de skalade och den sfäriska projektilen. Perforation av den bakomliggande plåten erhöles för cylindrar med massor ner till $1/7$ av sfärens massa. Splitterfronten hade för den kortare projektilen en 9 % högre genomsnittlig hastighet jämfört med projektilen ursprungliga, vilket är högre än för den skalade projektilen. Detta gällde dock inte den kortaste cylindern där fronten enbart uppnådde 66 % av projektilens ursprungliga hastighet. Anledningen är att stötvågen i detta fall utsätts för störande radiella vågor.

Studier där fler projektilformer undersöktes [37] visade att en solid sfär gav ett relativt litet hål i målplåten och att dess destruktiva förmåga reduceras kraftigt efter perforationen. En cirkulär skiva eller ring ger ett större hål men dess splittersvärm har låg destruktiv förmåga och dessutom har orienteringen betydelse. En ihålig sfär ger ett stort hål i målplåten och har god penetrationsförmåga efter perforation. Det visade sig dock att de är nästintill omöjliga att kasta ut från en stridsdel.

Den cylindriska projektilen ger ett litet hål i målplåten men har en fortsatt hög penetrationsförmåga i målet [37]. En ihålig cylinder ger ett stort hål och har även en god förmåga till efterföljande perforation. Dessa projektilformer är dock även beroende av orienteringen. Nosformen hos långa cylindriska projektiler utvärderas i [38] där en smal projektil med konformad nos och trubbig front visades vara den effektivaste. Denna projektil var dock känslig för snedställning och slogs då sönder.

5.5 Inverkan av projektilmaterial

Projektilmaterialets inverkan har undersökts i hastighetsområdet 4-5 km/s [39, 40], 7.6 km/s [41] och 2.13 km/s [31]. Slutsatserna av dessa studier var att bra egenskaper hos projektilen var hög densitet, hög smältpunkt, förmåga att motstå plastisk deformation och hoptryckning samt hög ytspänning i flytande tillstånd. Resultaten från undersökningen med olika material visas nedan, där de är rankade efter genomsnittlig effektivitet [37], där effektivitet betyder rörelsemängd efter plåten för fallet en sfärisk projektils penetration av en tunn plåt.

1. Platina
2. Nickel
3. Volfram- 26 % rhenium (stress-releived)
4. Niobium
5. Koppar
6. T-15 höghastighetsstål
7. Volfram – 5 % Rhenium (stress-releived)
8. Volfram – 26 % Rhenium (recrystallized)
9. Molybden
10. Silver
11. Titan

12. Volfram – 5 % Rhenium (recrystallized)
13. Volframkarbid
14. Aluminium

Motsvarande resultat vid undersökning av penetrationsdjup i ett halvoändligt mål med sfäriska projektiler av olika material i hastigheten 2.13 km/s visas nedan [31]

1. Volfram
2. Bly
3. Koppar
4. Stål
5. Aluminium
6. Magnesium

dvs. vid höga hastigheter är penetrationsdjupet relativt oberoende av projektilens hållfasthet men beroende av densiteten (hög densitet bra).

5.6 Inverkan av målmaterial

Det finns många artiklar som beskriver experimentella arbeten i extremt höga hastigheter där olika målmaterial används. Detta område behandlas endast kortfattat och referenser till artiklar i litteraturen presenteras för eventuella vidare studier.

Målplåtar med samma yttäthet får vid perforation i mycket höga hastigheter splittermoln med samma skadeverkan [34]. Massan hos splittermolnet minskar dock med ökad densitet och hålets storlek minskar med minskad tjocklek på målplåten vid jämförelse av tunna plåtar med samma ytvikt. Detta innebär att mål med hög densitet ger splittermoln med mindre material men ändå med samma verkan som ett material med lägre densitet och samma ytvikt. Anledningen till detta tros vara att de olika materialen kan övergå i olika tillstånd (faser) vid olika tillfällen. När splittermolnet består av fast material är det som mest effektivt, då materialet övergår till smälta respektive ånga minskar dess effektivitet markant. I en experimentell studie visades att det konstanta förhållandet mellan effektivitet och ytvikt gällde praktiskt taget alla mål med en densitet över 2000 kg/m³ [34]. De som hade en lägre densitet gjorde större skada för minskad densitet. Bland de material som hade en densitet över 2000 kg/m³ så har inte övriga materialparametrar någon betydelse, men för de som hade en lägre densitet har de det.

Några exempel på andra studier som utförts med inriktning på målmaterial är keramer i interaktion med långa volframpilar [42, 43, 44, 45, 46] och experiment med glas och volframpilar [47]. Det finns även en omfattande studie gjord med en mängd olika målmaterial, projektilmaterial och med hastigheter mellan 2.6 och 6.1 km/s [48, 49, 50]. I [41] genomfördes en experimentell studie med sfäriska aluminiumprojektiler mot olika material i 7.6 km/s.

5.7 Sammanfattning höga hastigheter

Vid bekämpning av ballistiska robotar uppstår interaktioner mellan motmedel och roboten i mycket höga hastigheter. Vid dessa höga hastigheter uppstår penetrationsfenomen som skiljer sig från penetration vid normala vapenhastigheter. Dessa fenomen kan resultera i att projektil och målmaterial splittras sönder, smälter och förångas. Den bakomliggande effekten blir störst vid deformation/fragmentering där restpenetration är möjlig. Vid smältning och förångning blir det sekundäreffekter i form av tryck och temperaturökningar. Vid söndersplittring är långa slanka projektiler mest effektiv som penetrator vad gäller bakomliggande effekt. Genom att använda slanka projektiler kan penetration av flera plåtar erhållas då endast främre delen av projektilen konsumeras vid perforation av tunna plåtar. Slanka projektiler är dock beroende av orienteringen vilket den mindre effektiva sfäriska projektilen inte är. Bra materialegenskaper hos projektilen är bland annat hög densitet och hög smältpunkt.

6 AVAL simuleringar

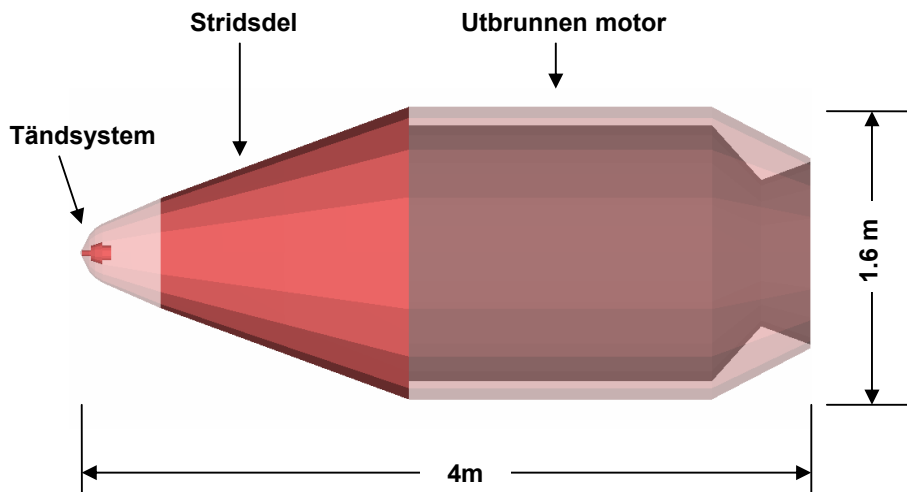
Verkan i en ballistisk robot som bekämpas med en splitterstridsdel kan till viss del studeras i AVAL. Det som i första hand kan undersökas är antalet splitterträffar i den ballistiska robotens stridsdel som en funktion av detonationsavstånd och infallsvinkel. I denna studie har vi skapat en generisk målbeskrivning av en återinträdande stridsdelsbärare med en liten raketmotor (en s.k. Post-Boost Vehicle) samt en generisk splitterstridsdel.

6.1 AVAL

AVAL (Assessment of Vulnerability And Lethality) är ett kommersiellt Monte-Carlo baserat simuleringsprogram som marknadsförs av FMV. Då AVAL räknar på splitterstridsdelar används en masspunktbaserad, med tre frihetsgrader, Runge-Kutta tidsdiskret simulering för att ta hänsyn till luftmotstånd och gravitationens inverkan på splitterbanan. Vid splitterträff i målet beräknas splittrets genomträngningsförmåga med hjälp av en funktion som tar hänsyn till dess hastighet och massa och hur dessa värden förhåller sig till data för ett angivet referenssplitter. Efter genomträngning av en komponent minskas splittrets genomslagsförmåga vid träff i nästa komponent med en funktion som beror av gångvägen genom den genomträngda komponenten och dess materialdata. AVAL håller hela tiden reda på vilka komponenter som är utslagna och, via ett generellt felträd, hur detta påverkar målets funktioner.

6.2 Målbeskrivning

I Figur 6 redovisas utseendet på målbeskrivningen samt antagna dimensioner.



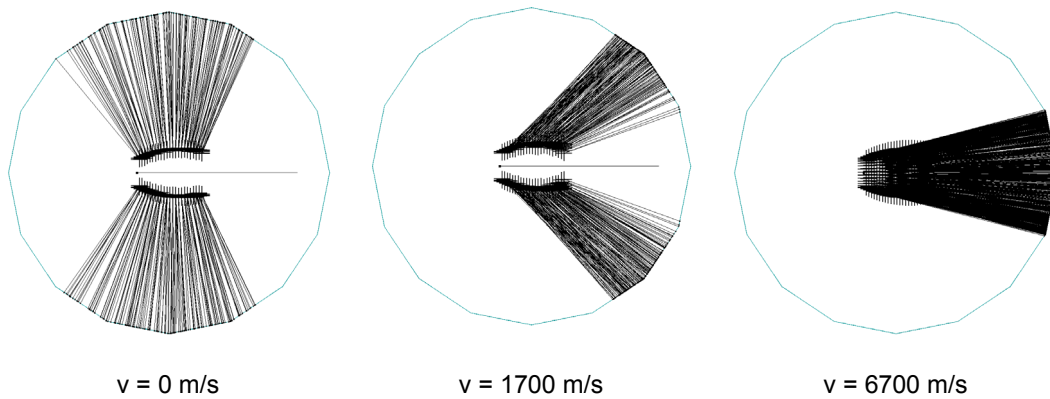
Figur 6: Generisk målbeskrivning av stridsdelsbärare.

Raketmotorn antas vara utbrunnen vid återinträdet i atmosfären vilket innebär att den inte innehåller något drivmedel. Verkan av splitterträffar har simulerats i AUTODYN och därför är inte stridsdelsinnehållet specificerat utan stridsdelen är beskriven som bestående av ett 20 mm tjockt stålhölje för att på så sätt kunna registrera när det penetreras. I simuleringarna är målets hastighet 5000 m/s, vilket är en rimlig nedslagshastighet för en långräckviddig ballistisk robot.

6.3 Vapenbeskrivning

Modellen för vapnet är en generisk beskrivning av ett ABM-vapen för slutfasbekämpning. Som förebild kan t.ex. Patriot PAC-2 nämnas. Vapnet består av en splitterstridsdel som totalt väger ca 90 kg. Höljet består av förfragmenterat stål och bildar vid detonation ca 1000 splitter som väger ca 40 g/styck. Eftersom vi i dessa simuleringar enbart vill studera splitterverkan mot ballistiska robotar är varken sensorer eller tändsystem beskrivna. Maxhastigheten på vapnet antas vara 1700 m/s (Mach 5).

I Figur 7 visas splitterfördelningen vid brisad för tre olika stridsdelshastigheter. De svarta strecken visar splittrens riktning. Stridsdelen är orienterad med fronten åt höger och dess rörelse är i samma riktning.

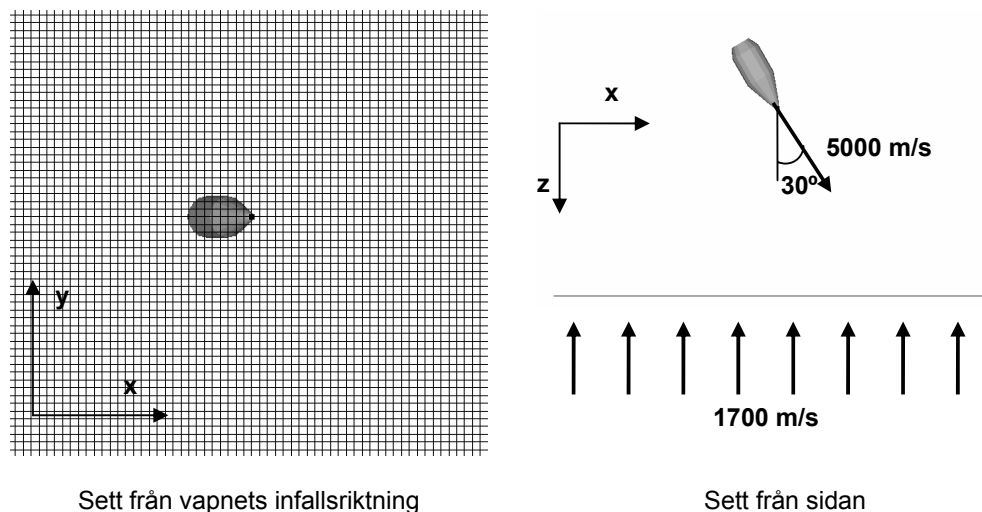


Figur 7: Splitterbild vid brisad för tre olika stridsdelhastigheter.

Splitterbilden vid 0 m/s motsvarar en statisk stridsdelsbrisad. När stridsdelen briserar då den håller en hastighet får splittren en hastighetskomponent i stridsdelens rörelseriktning. Vid 1700 m/s är vapnets hastighet av samma storleksordning som splitterutkastningshastigheten och därför får splittren en tydligt framåtriktad rörelse. Splitterbilden vid 6700 m/s motsvarar att vapnet med hastigheten 1700 m/s frontalt möter ett mål med hastigheten 5000 m/s. Splitterna är samlade i en smal framåtriktad kon.

6.4 Simuleringar

För att kunna undersöka hur många splitter som träffar målet vid olika brisadavstånd samt olika infallsvinklar genomfördes simuleringar där stridsdelen briserar på tre avstånd från den ballistiska roboten; 5, 10 och 20 m, för tre olika infallsvinklar; 0, 30 och 45 grader. För varje brisadavstånd samt infallsvinkel placerades ett rutnät med centrumpunkt på brisadavståndet från målets nos, orienterat enligt infallsvinkeln i förhållande till målets hastighetsvektor. I centrumpunkten på varje ruta briserades sedan stridsdelen och splitterträffarna av målet beräknades. Brisaderna skedde med 0.3 meters avstånd i x- och y-led, vilket motsvarar rutstorleken. Det totala rutnätets storlek anpassades för att alla brisader som leder till splitterträffar i målet skulle simuleras. I Figur 8 ges en principfigur för simuleringarna vid 30 graders infallsvinkel.

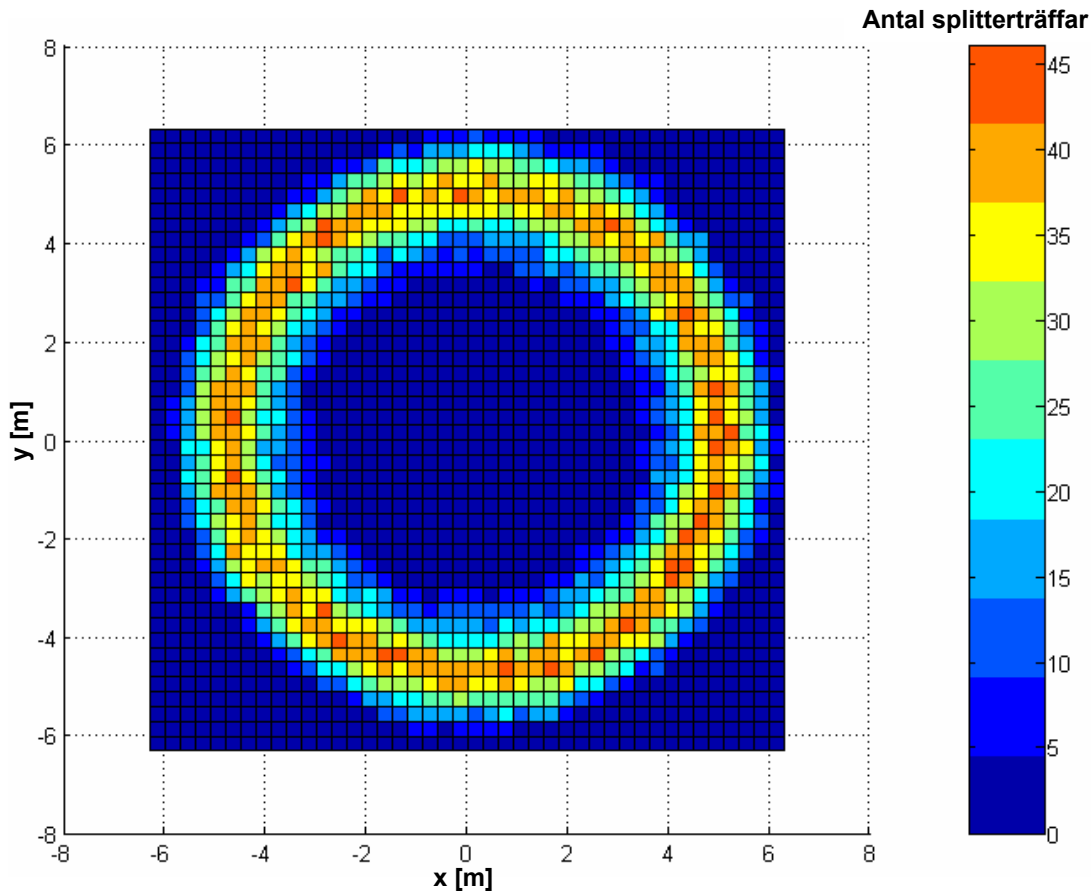


Figur 8: Principfigur för simuleringarna vid 30 graders infallsvinkel.

I simuleringarna har vapen samt mål samma orientering som respektive hastighetsvektors riktning, d v s målet är en ballistisk robot som går i en ballistisk bana utan att manövrera och vapnet genomför inga slutfasjusteringar av sin bana.

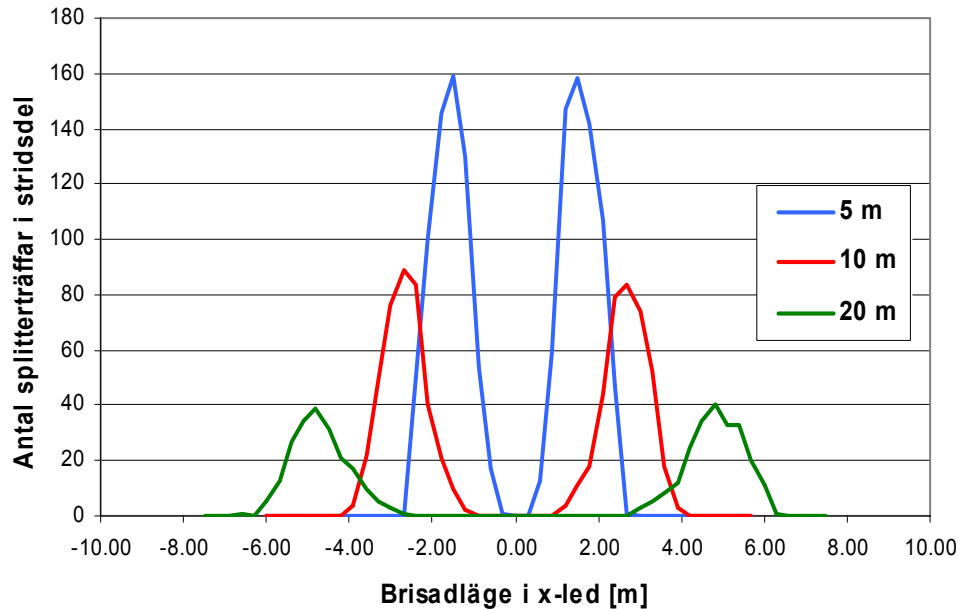
6.5 Resultat rakt infall

Vid noll graders infallsvinkel möts mål och vapen frontalt och splitterbilden är då samma som för $v = 6700$ m/s i Figur 7. Den höga relativa hastigheten innebär att splittren samlas i en smal framåtriktad kon vilket medför att det endast är i ett begränsat område som splittren har möjlighet att träffa målet. I Figur 9 visas antalet splitter som träffar målets stridsdel vid 20 meters brisadavstånd som en funktion av brisadläget.



Figur 9: Antalet splitterträffar i stridsdel vid 20 meters brisadavstånd som funktion av brisadläge.

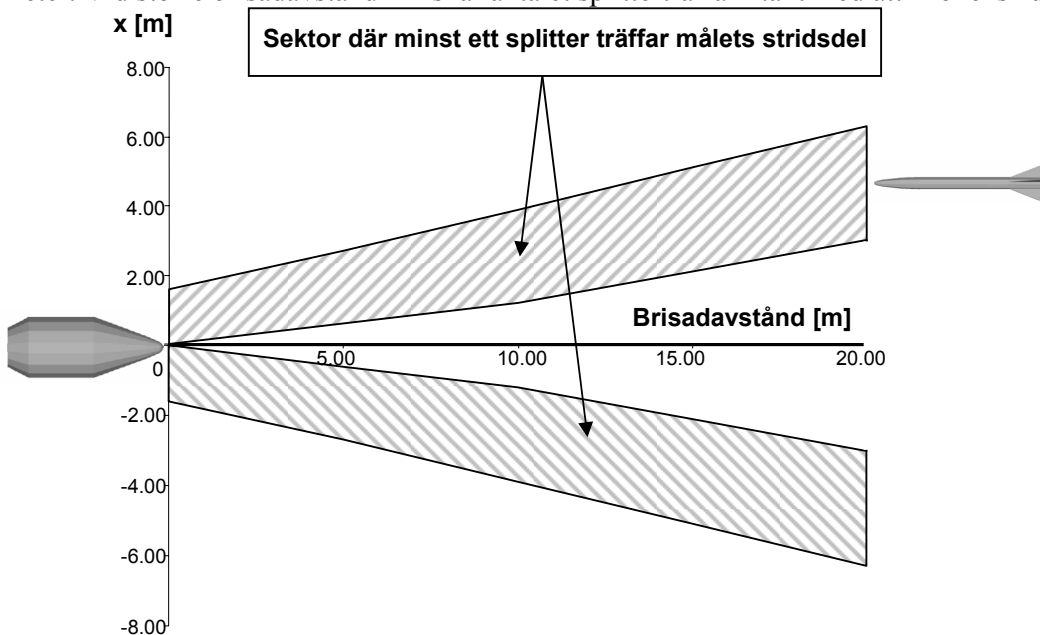
Målets centrum ligger i $x = 0$ och $y = 0$. Brisaderna sker på 20 meters avstånd i z -led från målet, där x - resp. y -koordinaterna varierar. Brisadlägena motsvarar rutornas centrumpunkt i rutnätet. Symmetrin möjliggör plottning i två dimensioner och i Figur 10 redovisas antalet splitterträffar som funktion av brisadläge i x -led ($y = 0$) för brisadavstånden 5, 10 och 20 meter.



Figur 10: Antal splinterträffar i stridsdel som funktion av brisadläge i x-led för tre olika brisadavstånd.

De höga relativa hastigheterna medför att det är i ett smalt intervall som brisaden måste ske om splitterna överhuvudtaget ska träffa målets stridsdel. Rakt framifrån sker en dipp i antalet splinterträffar vilket beror på att splittern hinner förflytta sig tillräckligt långt i radiell led innan målet passerar. Detta betyder dock inte att den ballistiska roboten är opåverkad eftersom delar från den detonerade roboten kan träffa målet i denna sektor. Att värdera verkan av dessa är inte möjligt i dagsläget utan det krävs försök eller annat underlag för att kunna fastställa storlekar och utkastningsriktningar på robotresterna.

I Figur 11 visas den sektor där en brisad av stridsdelen medför att minst ett splinter träffar målets stridsdel. Sektorn visas plant och är rotationssymmetrisk kring x-axeln, dvs. i rummet har sektorn utseendet av en delvis ihålig stympad kon. Sektorns utseende visas bara till det maximalt simulerade brisadavståndet 20 meter. Vid större brisadavstånd minskar antalet splinterträffar i takt med att ”konens” diameter ökar.

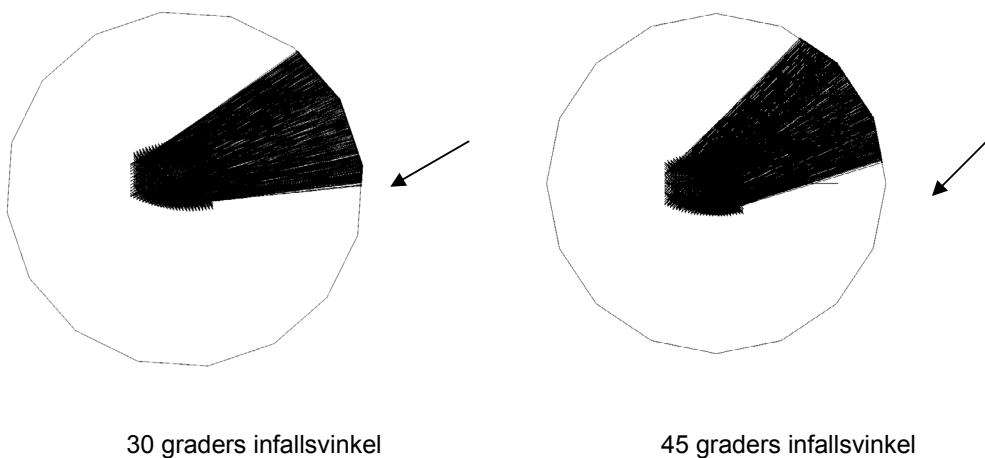


Figur 11: Sektor där minst ett splinter träffar målets stridsdel.

Som framgår av Figur 10 och Figur 11 är området där en stridsdelsbrisad leder till träffar av stridsdelen mycket smalt. Endast vid mycket korta brisadavstånd är den sektor där mer än 20 splitter träffar stridsdelen bredare än två meter. I figuren ovan kan utläsas att den maximala längden på sektorn där minst ett splitter träffar är ca 15 meter, vilket motsvarar ett tidsfönster på 2 ms vid de hastigheterna som här simulerats. Detta är ingen anmärkningsvärd kort tid i detonationssammanhang utan den stora svårigheten ligger i att ha en sensor som med tillräcklig noggrannhet kan bestämma hastighet, läge och riktning på målet för att rätt brisadläge ska kunna beräknas.

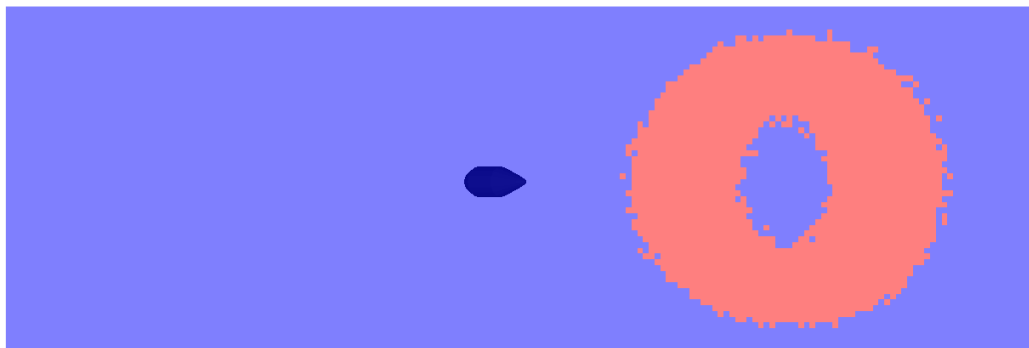
6.6 Resultat 30 och 45 graders infallsvinkel

När mål och vapen inte infaller frontalt mot varandra ändrar splitterbilden karaktär. Splittrens riktning beror på splitterutkastningshastigheten och vapnets hastighet. Splitterbilden, så som målet upplever den, beror även på målets hastighet och riktning. Vid de höga hastigheter som är aktuella i detta scenario så upplever målet splitterbilden som kraftigt förskjuten i riktning mot målets rörelseriktning. I Figur 12 visas splitterbilden, så som den upplevs av målet, vid 30 resp. 45 graders infallsvinkel mellan vapen och mål. Stridsdelen är orienterad med fronten åt höger och dess rörelse är i samma riktning. Pilarna visar målets rörelseriktning. Målets läge har ingen inverkan på splitterbilden, varför pilarnas placering ej ska tolkas som målets position. Hastighet för vapnet är 1700 m/s och målets hastighet är 5000 m/s.



Figur 12: Splitterbild vid brisad för 30° resp. 45° infallsvinkel.

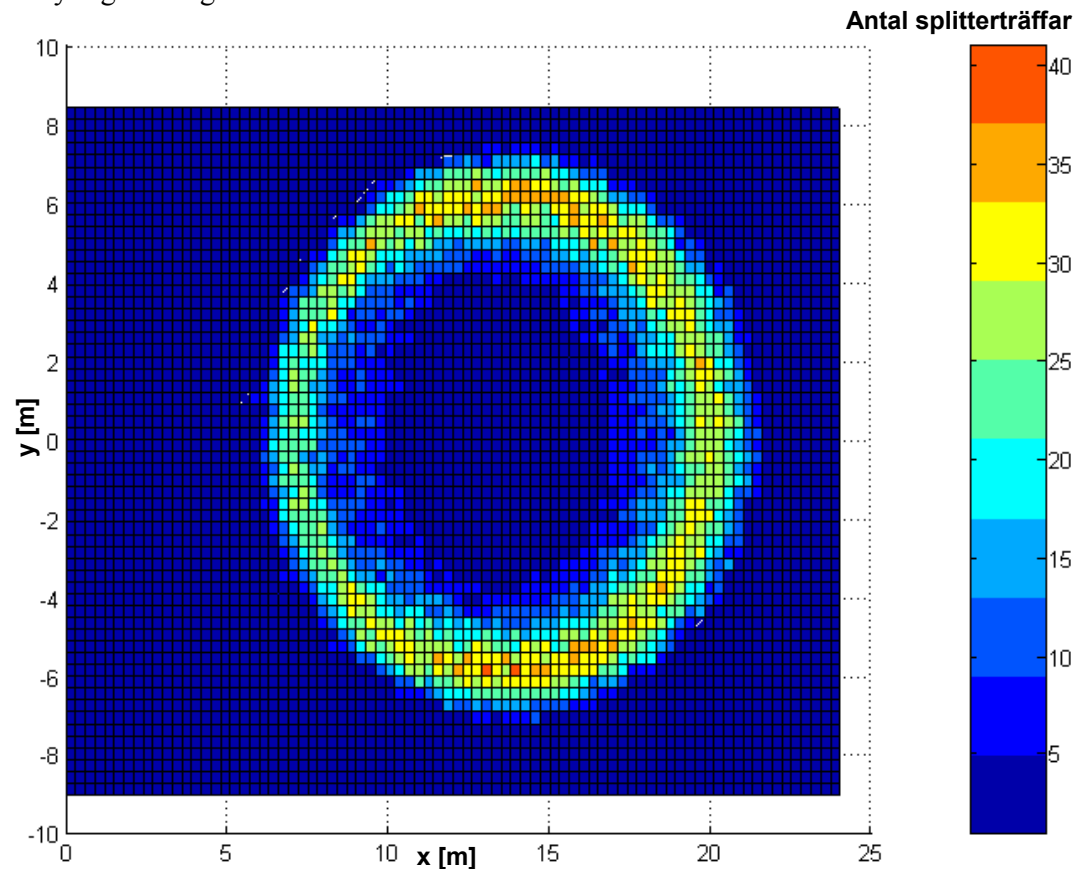
Den förskjutna splittersfördelningen påverkar sektorn där brisad leder till träff. I Figur 13 visas det område där minst ett splitter träffar målets stridsdel vid 20 meters brisadavstånd och 45 graders infallsvinkel. Vid brisad i det röda området träffas stridsdelen, vid brisad i det blå området träffas inget splitter. Målet syns i mitten av bilden. Det färgade områdets storlek är 54x18 meter.



Figur 13: Område där minst ett splitter träffar målets stridsdel, brisadavstånd 20 m, 45° infallsvinkel.

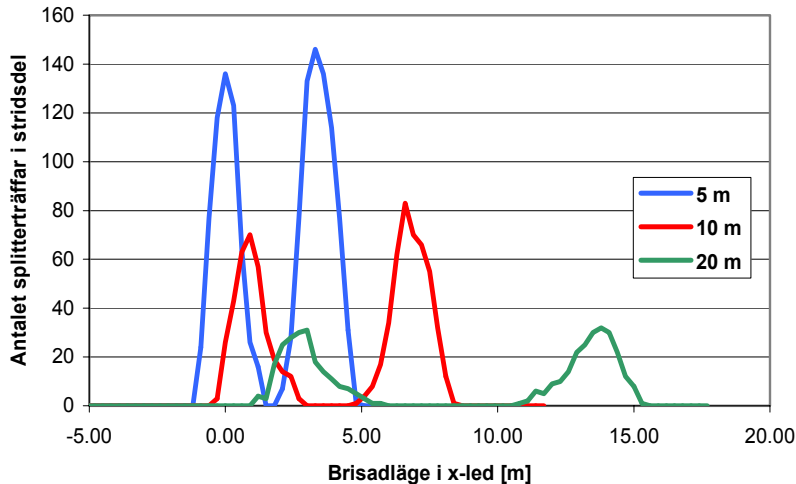
I Figur 14 visas antalet splitter som träffar målets stridsdel vid 20 meters brisadavstånd och 45 graders infallsvinkel (samma fall som ovan) som en funktion av brisadläget. Målets nos ligger i $x = 0$ och $y = 0$ och brisaderna sker i ett plan på 20 meters avstånd i z-led från målet, där x- resp. y-koordinaterna

varieras. Vapnet infaller 45 grader mot målets hastighetsvektors riktning i x-z-planet. Principen finns förtydligad i Figur 8.

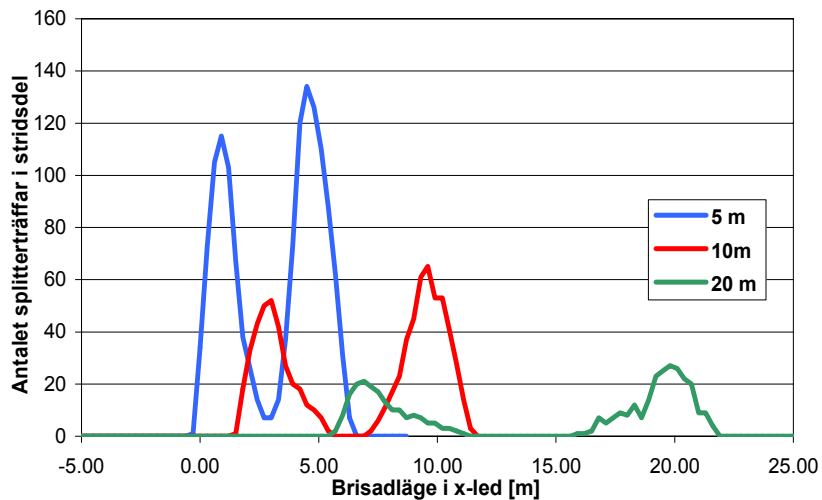


Figur 14: Antalet splitterträffar i stridsdel vid 20 meters brisadavstånd och 45° infallsvinkel som funktion av brisadläge.

Största förändringen är att området där splitter kan träffa stridsdelen förskjuts. Fördelningen ändrar också utseende beroende på om brisadläget är sådant att splittren som träffar målet kommer från den sida av vapnet som är vänd mot målet eller ej. Speglat i x-axeln är fördelningen egentligen symmetrisk i y-led, skillnaderna beror på den slumpmässighet som är medtagen vid splitterutkastningen och som framträder då endast en brisad sker i varje läge. Trots att fördelningen inte symmetrisk i x-y-led kan det ändå vara intressant att undersöka antalet splitterträffar som en funktion av brisadavstånd. I Figur 15 redovisas antalet splitterträffar som funktion av brisadläge i x-led ($y = 0$) för brisadavstånden 5, 10 och 20 meter vid 30 graders infallsvinkel. I Figur 16 visas motsvarande resultat vid 45 graders infallsvinkel.



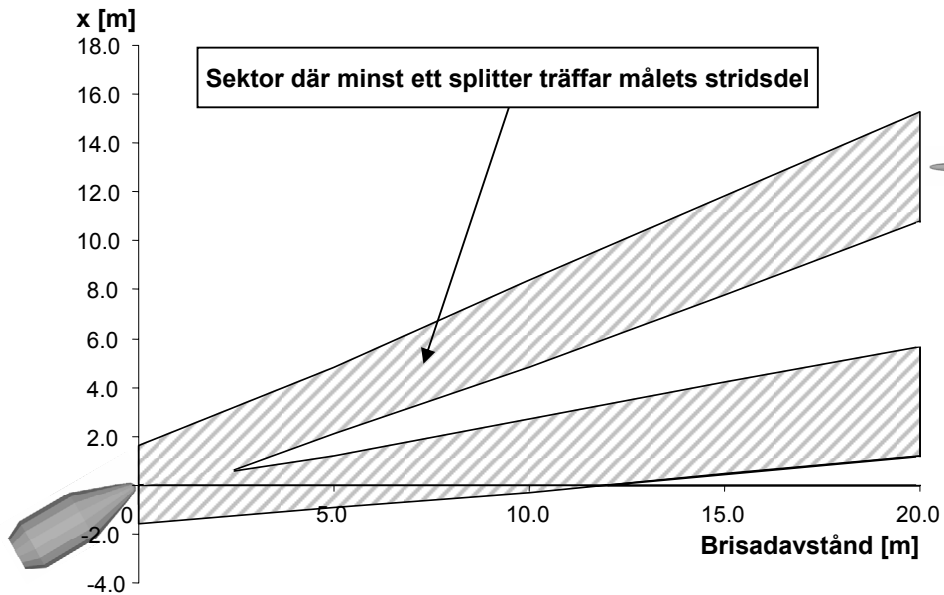
Figur 15: Antal splitterträffar i stridsdel som funktion av brisadläge i x-led för tre olika brisadavstånd vid 30° infallsvinkel.



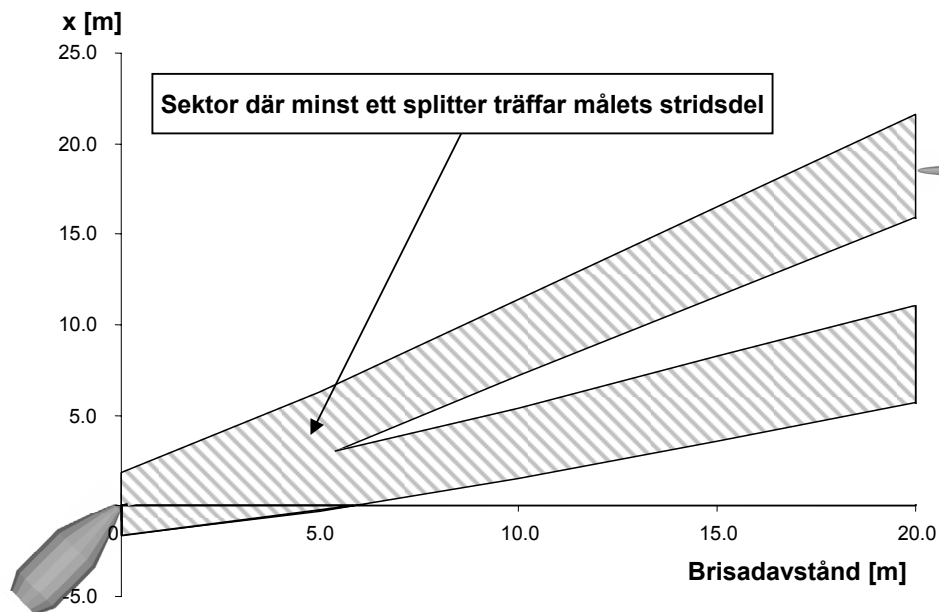
Figur 16: Antal splitterträffar i stridsdel som funktion av brisadläge i x-led för tre olika brisadavstånd vid 45° infallsvinkel.

Som framgår av figurerna är zonerna där brisad måste ske endast ett fåtal meter breda. Vid snett infall finns samma karakteristiska dubbeltoppar som för rakt infall och förklaringen till dipparna är den samma; målet flyger på kollisionskurs med vapnet och splittren från vapnet hinner flytta sig tillräckligt långt i radiell led för att målet ska kunna passera utan att träffas. Även vid snett infall finns möjligheten att målet träffas av vapenrester i denna sektor.

I Figur 17 visas den sektor där en brisad av stridsdelen medför att minst ett splitter träffar målets stridsdel vid 30 graders infallsvinkel. I Figur 18 visas motsvarande sektor vid 45 graders infallsvinkel. Sektorerna visas plant och är nästan rotationssymmetriska (sektorerna är något smalare i y-led som framgår av Figur 14) kring en tänkt axel mellan de två områdena. Sektorernas utseende visas bara till det maximalt simulerade brisadavståndet 20 meter. Vid större brisadavstånd minskar antalet splitterträffar i takt med att bredden på området ökar.



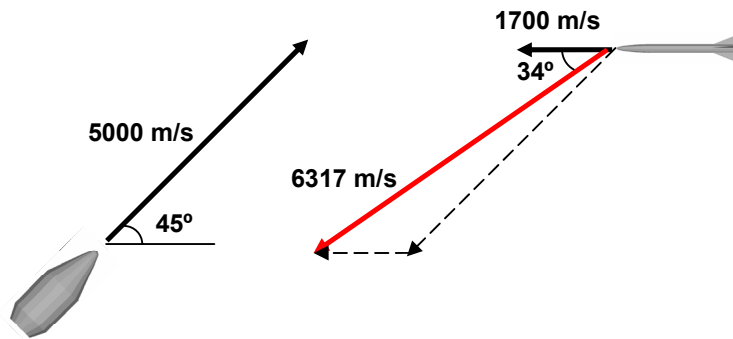
Figur 17: Sektor där minst ett splitter träffar målets stridsdel vid 30° infallsvinkel.



Figur 18: Sektor där minst ett splitter träffar målets stridsdel vid 45° infallsvinkel.

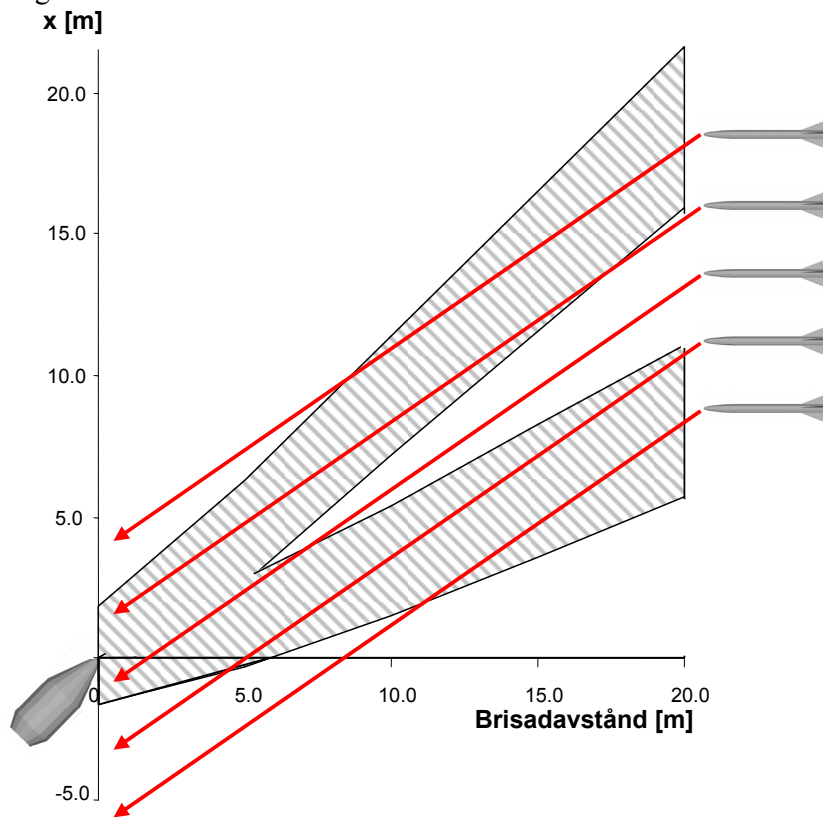
Värt att notera i figurerna ovan är att endast vid korta brisadavstånd träffar splitter målets stridsdel när målet befinner sig rakt framför vapnet, dvs. om vapnets sensor upptäcker målet när det befinner sig rakt framför sig är det redan för sent; målet kommer inte träffas av några splitter.

Tiden som vapnet befinner sig i träffsektorn beror delvis på vapnets position i förhållande till målets. Vid snett infall rör sig vapnet snett genom träffsektorerna med en hastighet och riktning som beror på den relativa rörelsen mellan vapen och mål. I figuren nedan visas riktning och storlek på den relativa hastigheten (röd pil) mellan vapen och mål vid 45 graders infallsvinkel.



Figur 19: Relativ hastighet mellan vapen och mål vid 45° infallsvinkel.

I Figur 20 visas, med röda pilar, hur vapnet rör sig genom träffsektorerna för fem olika startpositioner vid 45 graders infallsvinkel.



Figur 20: Hur vapnet rör sig genom träffsektorerna för fem olika startpositioner vid 45° infallsvinkel.

Vapnets rörelse genom sektorerna sker med relativhastigheten mellan vapen och mål, i detta fall ca 6300 m/s. I figuren ovan kan utläsas att om vapnet hamnar utanför sektorerna antingen över eller under så är riktningen på den relativa rörelsen sådan att vapnet fortsätter att vara utanför. Om vapnet befinner sig mellan sektorerna så kommer det tids nog förflyttas in i dem antingen den övre eller undre beroende på läge.

De vapenbanor som är inritade i Figur 20 är placerade med ca två meters avstånd i x-led. Optimalt brisadavstånd kan sägas vara då vapnet befinner sig i mitten av en sektor eftersom flest splitter då träffar stridsdelen. Det framgår av bilden att det optimala brisadavståndet för respektive utritad bana motsvarar ett brisadavstånd som ligger utanför eller på gränsen av sektorerna för vapenbanorna som ligger två meter över och under. Alltså medför en felbedömning av målets läge med två meter att möjligheten att träffa målet med splitter markant minskas. Om målets hastighet och riktning också felbedöms minskas möjligheten ytterligare.

Sektorerna visas endast upp till det maximalt simulerade brisadavståndet och det är därför fullt möjligt att träffa målets stridsdel med splitter även vid större brisadavstånd, men som framgår av Figur 15 och Figur 16 är antalet splitterträffar vid 20 meters brisadavstånd starkt reducerat. Vid större brisadavstånd kommer därför sannolikheten för träff att minska i takt med att de utkastade splittren fördelas över en större yta.

6.7 Sammanfattning splittersimuleringar

För att med en splitterstridsdel kunna erhålla verkan i ett mål som rör sig med en hastighet som är större än splitterutkastningshastigheten ställs stora krav på vapnets styrning, sensorer och tändsystem. Vid frontalt infall mellan vapen och mål är området där brisad leder till splitterträff smalt och relativt kort. Vid snett infall råder samma begränsningar men dessutom måste målets framtida bana predikteras eftersom brisaden måste ske i ett område som är förskjutet utifrån den relativa hastigheten mellan vapen och mål.

Vid rakt infall är det tänkbart att använda en mer vanlig typ av zonrör eller lasersensor med en relativt smal strålbredd. Detta förutsatt att målets hastighet är känd och strålbredden kan anpassas eftersom utseendet på den sektor där brisad leder till träff beror på målhastigheten. Vid de hastigheter som här simulerats krävs att mål och vapen möts inom en sektor som inte är mycket bredare än 10-20 meter om ett tillförlitligt antal splitter ska träffa målet.

Vid snett infalls krävs någon annan typ av tändsystem. Som framgår av Figur 17 och Figur 18 krävs att vapnets sensor har en stor strålbredd så att det kan upptäcka målet innan det befinner sig framför vapnet eftersom vapnet då riskerar att vara utanför träffsektorn. Om målet upptäcks måste även dess riktning och hastighet vara känd eftersom utseendet på träffsektorn och därför även det optimala brisadläget beror på detta. Brisadområdet rör sig med relativhastigheten mellan vapen och mål och för att vapnet ska ha en chans att komma inom denna sektor måste därför målets bana predikteras. Vapnets betydligt lägre hastighet medför att vapnet måste styras mot ett område där mål och vapen möts vid ett senare tillfälle. Även om målets bana kan predikteras med stor noggrannhet så är bredden på det område där ett tillförlitligt antal splitter träffar målets stridsdel mycket liten.

7 AUTODYN simuleringar

Utgångspunkten i denna delstudie har varit substridsdelar med en BC-agens i vätskeform. För att studera hur BC-behållarna påverkas då de träffas av olika typer av projektiler har tre grupper av simuleringar genomförts i det kontinuummekaniska programmet AUTODYN. Påverkan på de enskilda behållarna studeras för att undersöka vilka mekaniska och termiska påkänningar behållare samt stridsmedel upplever då de träffas av en projektil. I nästa grupp simuleringar studeras skadevolymen, dvs. hur många behållare en viss projektil kan slå sönder. Slutligen har en direkträff simulerats.

7.1 AUTODYN

AUTODYN är ett explicit finita differens program som är avsett för simuleringar av snabba deformationsförlopp. Programmet är en kommersiell kod som är utvecklat av CENTURY DYNAMICS. AUTODYN innehåller ett flertal avancerade materialmodeller för att så bra som möjligt beskriva olika material vid höga töjningshastigheter, tryck och temperaturer. Simuleringarna görs genom att modellen delas in i ett fint nät, varefter programmet löser de styrande partiella differentialekvationerna så bra som möjligt. Däremot, i ett finita element program löses differentialekvationerna indirekt genom att en funktional (potentiella energin) minimeras. Ur användarsynpunkt föreligger dock ingen skillnad mellan dessa två olika metoder. Inte heller ur noggrannhetssynpunkt finns det någon skillnad.

7.2 Indata och material

För enkelhets skull antogs att BC-behållarna var sfäriska, vilket gör att beräkningstiden blir mycket kort då simuleringen kan utföras i 2-D (rotationssymmetri).

För att simulera stridsmedlet i behållarens centrum användes data för vatten från AUTODYNS materialbibliotek. För att beskriva kompressionen för vatten användes Mie-Grüneisens ekvation (se Bilaga 1). För den omgivande stålmanteln valdes materialdata för ett stål med relativt ordinär hållfasthet. För enkelhets skull valdes en elastisk-idealplastisk (inget deformationshårdnande) materialmodell med flytspänningen 0.5 GPa och brottöjningen 50 %. För projektilen valdes materialdata för en volframlegering (WHA) med materialdata från [51]. I [52] finns även liknande materialdata för en volframlegering. Materialdata för volframlegeringen redovisas i Bilaga 1.

Simuleringarna utfördes med en generisk behållare med en ytterdiameter på 120 mm och godstjockleken är 3 mm. I ett fall gjordes även en simulering med en dubbelt så stor behållare. Projektilen var sfärisk med diametern 20 mm och massan 75.3 g. Denna kan sägas vara representativ för ett relativt stort splitter från en splitterstridsdel. För att belysa projektilformens betydelse gjordes även en simulering med en cylindrisk projektil med diametern 20 mm och längden 100 mm ($m=552$ g). Anslagshastigheten var vanligen 5 km/s, men några simuleringar gjordes även med hastigheterna 3 km/s och 1.5 km/s.

För att ge en uppfattning av noggrannheten i modellen kan det nämnas att i modellen består det sfäriska stålskalet runt vätskan av 8 element/celler i tjockleksriktningen. I omkretsriktningen består skalet och vätskan av ca 150 element på ett halvt varv. Den sfäriska projektilen har ca 34 element längs diametern. Denna indelning antas vara tillräcklig för att ge en godtagbar noggrannhet. Någon konvergensstudie genom att variera antalet element har dock inte gjorts.

Modellen gjordes med Lagrange-formulering av både projektil och mål. I detta fall finns även möjligheten att välja om noderna (och massan) till de element som eroderas skall finnas med i simuleringen eller inte. Det visade sig emellertid att resultatet förmodligen blir mer realistiskt om de fria noderna som finns kvar efter erosion av elementen finns kvar och kan växelverka med övriga delar i modellen. Ett försök gjordes även med Euler-formulering av behållaren (skal+vätska) och Lagrange-formulering av projektilen. I detta fall lyckades inte programmet med energikonservering varför

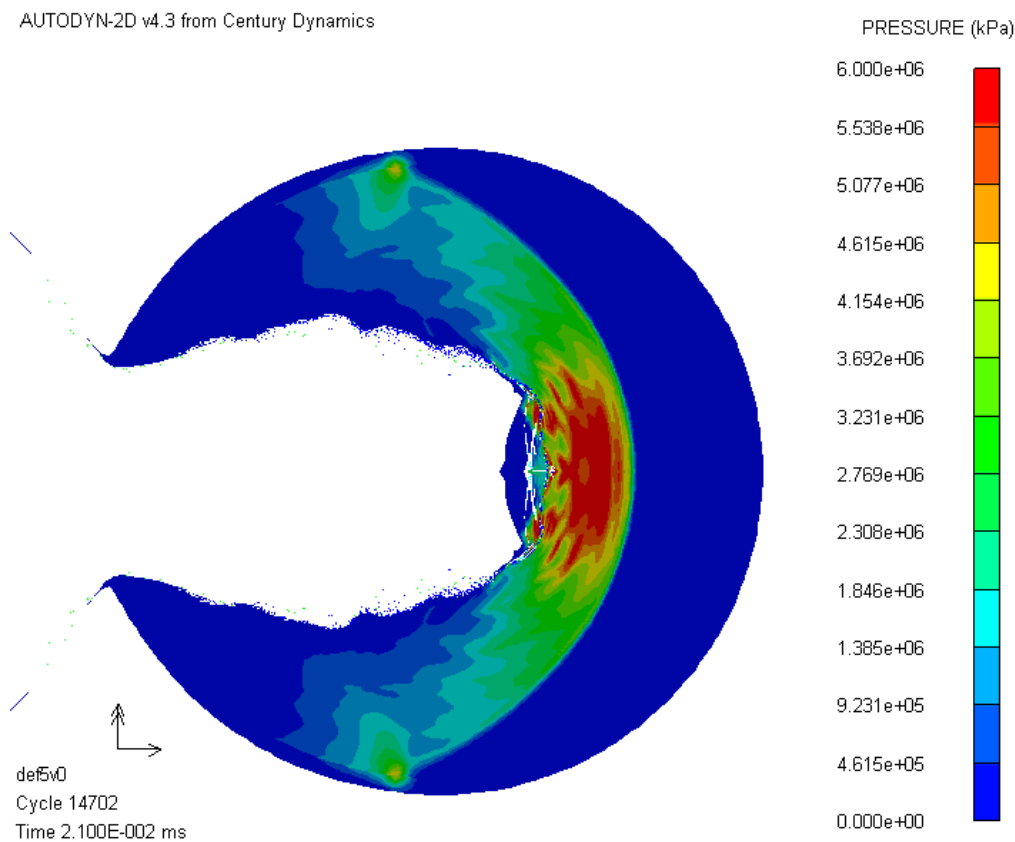
simuleringen avbröts. Inget tyder dock på att resultatet blir särskilt annorlunda jämfört med Lagrange-formulering av målet.

7.3 Verkan i enskild behållare

Syftet med dessa simuleringar är dels att belysa hur projektilen påverkas vid interaktion med behållaren och dess innehåll men framförallt för att studera hur behållaren påverkas, går den sönder och i så fall hur? Tryck och temperatur i vätskan är också av stor relevans eftersom de kan ge underlag för att bedöma hur stor andel av agensen som förstörs vid en träff. I detta sammanhang är det även intressant att studera om hela behållaren kommer att explodera på grund av den höga kortvariga tryckpuls som uppstår vid penetrationen. Detta brukar även kallas "hydraulic ram" effekt i engelskspråkig litteratur och beror på vattnets låga kompressabilitet.

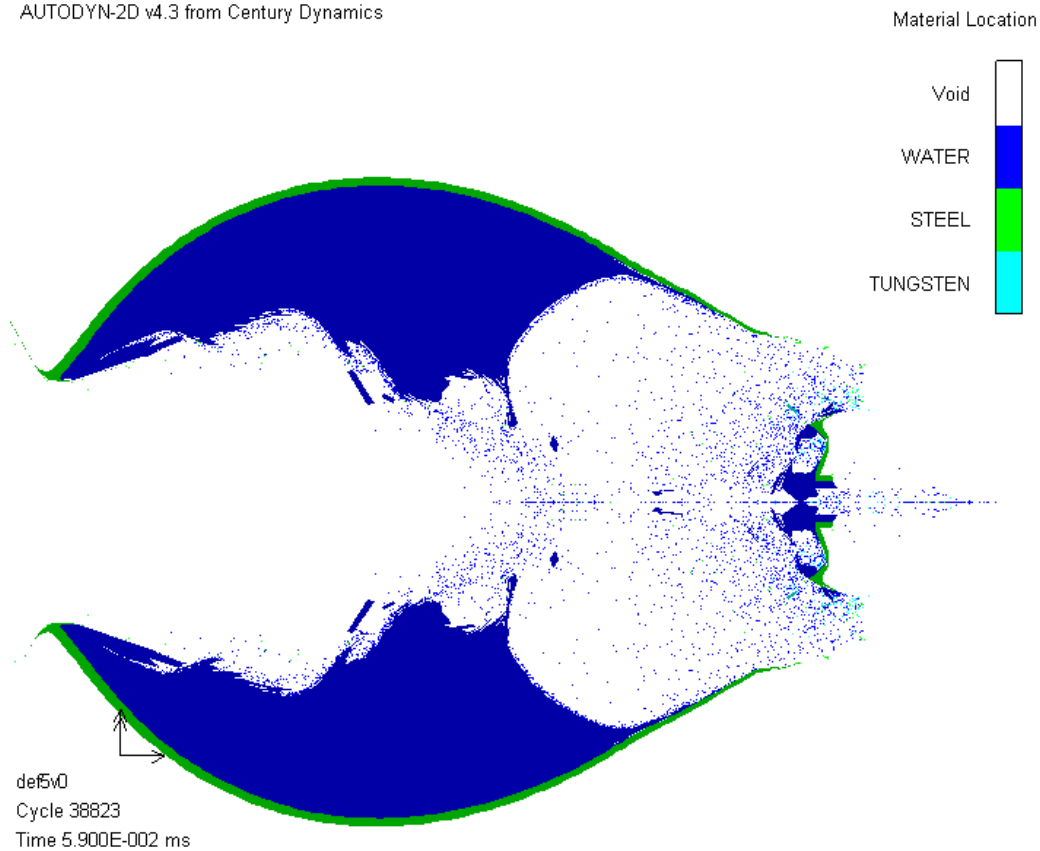
Den simulerade WHA-sfären deformerar och eroderas kraftigt vid alla undersökta hastigheter (1.5-5 km/s). I princip förbrukas hela sfären vid penetrationen av behållaren. Vid hastigheterna 3 km/s och 5 km/s förloras ca 80 % av projektilens rörelseenergi och rörelsemängden minskar med ca 56 %. Det visar sig dock att en relativt stor del av penetrationsförmågan finns kvar efter penetrationen av behållaren. Detta beror på att vätskan i behållaren får en ganska stor rörelseenergi, som i sin tur kan fungera som penetrator. Detta belyses i nästa stycke, där interaktionen med flera behållare har simulerats.

I Figur 21 visas trycket i behållaren vid anslagshastigheten 5 km/s.



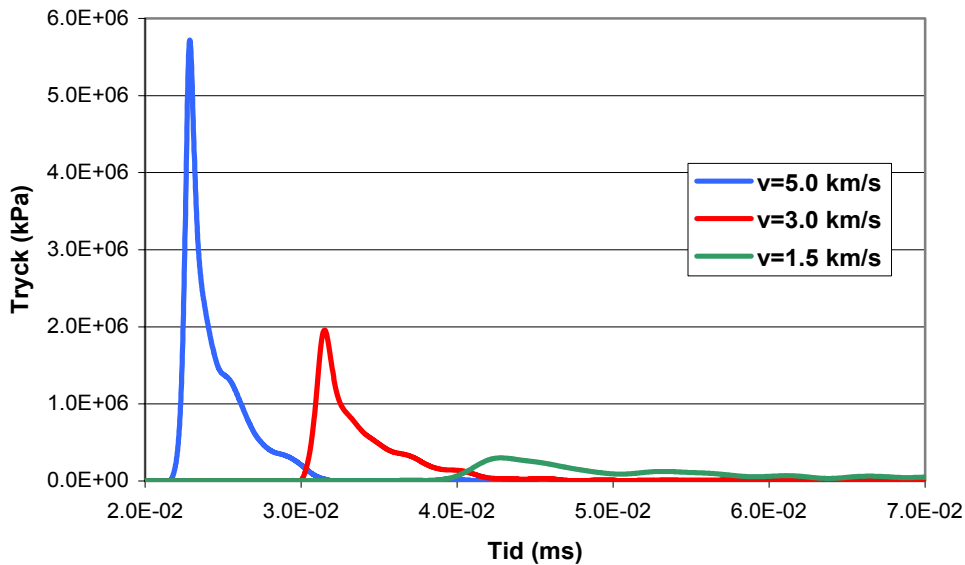
Figur 21: Tryck vid anslagshastigheten 5 km/s

I Figur 22 visas penetrationen vid en senare tidpunkt. Vid denna tidpunkt är trycket i vätskan i princip noll, men kärnväggen har relativt höga expansionshastigheter.



Figur 22: Penetration vid anslagshastigheten 5 km/s.

För att studera trycket valdes en punkt placerad kl. 12 i Figur 21 alldeles intill kärlväggen. I samtliga simuleringar användes denna referenspunkt för att jämföra trycket. Trycket varierar dock något längs kärlväggen och är till exempel högre i en punkt kl. 2 än i en punkt kl. 12. Detta tryck kan sägas ha en viss betydelse för om hela behållaren skall explodera. En explosion av en behållare medför till exempel en större sannolikhet att omgivande behållare skadas. I Figur 23 visas detta tryck (kl. 12) för tre olika hastigheter. Det framgår att hastigheten har en stor inverkan på maxtrycket och att trycket kan bli så högt som 5.7 GPa. Vidare framgår att tryckpulsen är mycket kortvarig, åtminstone för hastigheterna 3 respektive 5 km/s.



Figur 23: Tryck (kl. 12) som funktion av tid för olika anslagshastigheter.

I Tabell 3 visas maxtrycken (i punkten kl. 12) och impulsintensitet (trycket integrerat över tiden) från flera olika simuleringar. I detta fall avses det tryck som uppnås vid reflektion med insidan av kärlväggen.

	Hastighet (km/s)	Tryck (GPa)	Impulsintensitet (kPas)
Projektil: Stel sfär	5.0	2.10	6.2
Projektil: Stel sfär	3.0	1.02	3.6
Projektil: WHA sfär	5.0	5.72	11.0
Projektil: WHA sfär	3.0	1.96	6.1
Projektil: WHA sfär	1.5	0.30	4.0
Projektil: WHA cylinder L/D=5, R=10 mm	5.0	8.75	13.1
Projektil: WHA sfär Halverad densitet på projektil, m=37.6 g	5.0	4.60	9.1
Projektil: WHA sfär Dubbelt så tjockt skal på behållare	5.0	7.9	17.5
Projektil: WHA sfär Dubbelt så stor behållare R=120 mm, t=3 mm	5.0	1.11	5.4
Projektil: WHA sfär Dubbelt så starkt skal på behållare Y=1.0 GPa	5.0	5.22	10.8

Tabell 3: Tryck och impulsintensitet vid olika projektiler, hastigheter och geometrier.

Det framgår att impulsintensiteten påverkas mindre av hastigheten än vad maxtrycket gör. Förutsatt att tryckpulsen är kortvarig så är impulsintensiteten den relevanta parametern för att bedöma belastningen på den omgivande kärlväggen. Det framgår vidare att för en stel sfär blir både maxtrycken och impulsintensiteten betydligt mindre än för en WHA-sfär som deformeras. Detta beror på att en projektil som deformeras överlämnar en större del av sin rörelseenergi till den omgivande vätskan. Det framgår även att en WHA-cylinder (L/D=5) ger en högre impulsintensitet och dessutom förbrukas inte hela projektilen vid penetrationen.

Vidare framgår av Tabell 3 att en dubbelt så stor behållare ger i stort sett en halvering av impulsintensiteten. Detta gör att sannolikheten för att hela behållaren skall explodera/fragmentera minskar, å andra sidan kan färre behållare packas i stridsdelen. Vidare framgår att en sfär med en dubbelt så tjock skal ökar impulsintensiteten med ca 60 %, vilket är något förvånande. Detta innebär att även om skalet är starkare så kan den ökande impulsintensiteten orsaka explosion av behållaren. I ref [53] mättes trycket i en behållare med vatten, som besköts med aluminiumsfärer. Maxtrycket uppmättes i detta fall till ca 0.1-1.3 GPa.

I Tabell 4 visas kärlväggens radiella hastighet efter fragmentering. Hastigheten gäller för en punkt (kl. 12) i närheten av den punkt där trycket avlästes, enligt Tabell 3. För anslagshastigheten 1.5 km/s inträffar ingen fragmentering i den punkt där hastigheten avlästs.

Anslagshastighet (km/s)	Kärlväggens radiella hastighet (m/s)
1.5	0
3.0	155
5.0	380

Tabell 4: Skalväggens radiella hastighet (vinkelrätt mot anslagsriktning) efter fragmentering

Hastigheterna i Tabell 4 är låga vilket medför att fragmenten behöver vara ganska stora för att kunna penetrera kringliggande behållare. Storleken på splittren kan i dagsläget inte fås med någon större precision från simuleringen. För att få en realistisk massfördelning på splittren krävs att simuleringen görs i 3-D och att en realistisk defektfördelning kan läggas in i modellen. Möjlighet att lägga in defektfördelningar kommer att vara möjlig i nästa version av AUTODYN. Fragmenthastigheterna snett framåt är dock större än de som redovisas i Tabell 4.

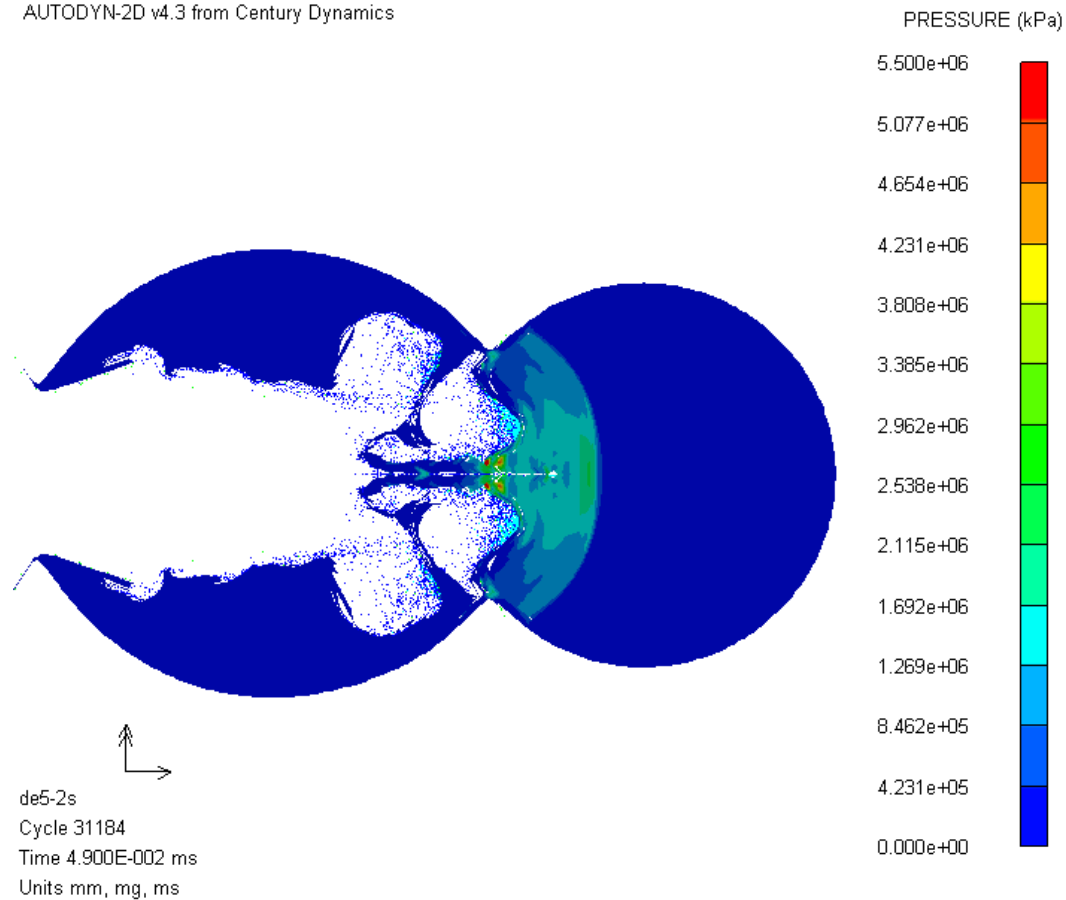
Simuleringarna visar att temperaturökningarna i vätskan blir måttlig förutom precis framför projektilen. Temperaturökningarna rör sig vanligen om endast ett fåtal grader (ca 10-25 °C). Detta innebär att ett BC-stridsmedel antagligen inte påverkas av värmeutvecklingen. I simuleringarna har värmekapaciteten för vatten använts. Eftersom värmekapaciteten har stor betydelse för temperaturökningen och värmekapaciteten för vatten är relativt hög, så är det troligt att temperaturökningen blir större i ett verkligt stridsmedel.

7.4 Verkan i flera behållare

Simuleringar mot flera behållare har genomförts dels för att undersöka hur många behållare som kan penetreras men även för att studera hur många behållare, både i skottlinjen och kringliggande, som kan skadas av en projektil. Eftersom modellen är i 2-D är det dock inte möjligt att direkt studera påverkan på intilliggande behållare. Penetration av de behållare som ligger precis i skottlinjen bakom den behållare som träffas är däremot möjlig. För att på ett förenklat sätt även ta hänsyn till påverkan på intilliggande behållare gjordes en modell där två sfäriska behållare omsluts av en torusring. I ingen av de simuleringar som gjorts har någon hänsyn tagits till penetration av hotstridsdelens ytterhölje. Effekterna av ytterhöljet finns beskrivna i kapitel 5.

I Figur 24 visas en del av förloppet (ej sluttillståndet) då två behållare träffas av en sfäriska WHA-projektil med hastigheten 5 km/s. Simuleringen visar att båda behållarna penetreras och det är relativt sannolikt att även skalet på en tredje behållare, i skottlinjen, skulle kunna punkteras.

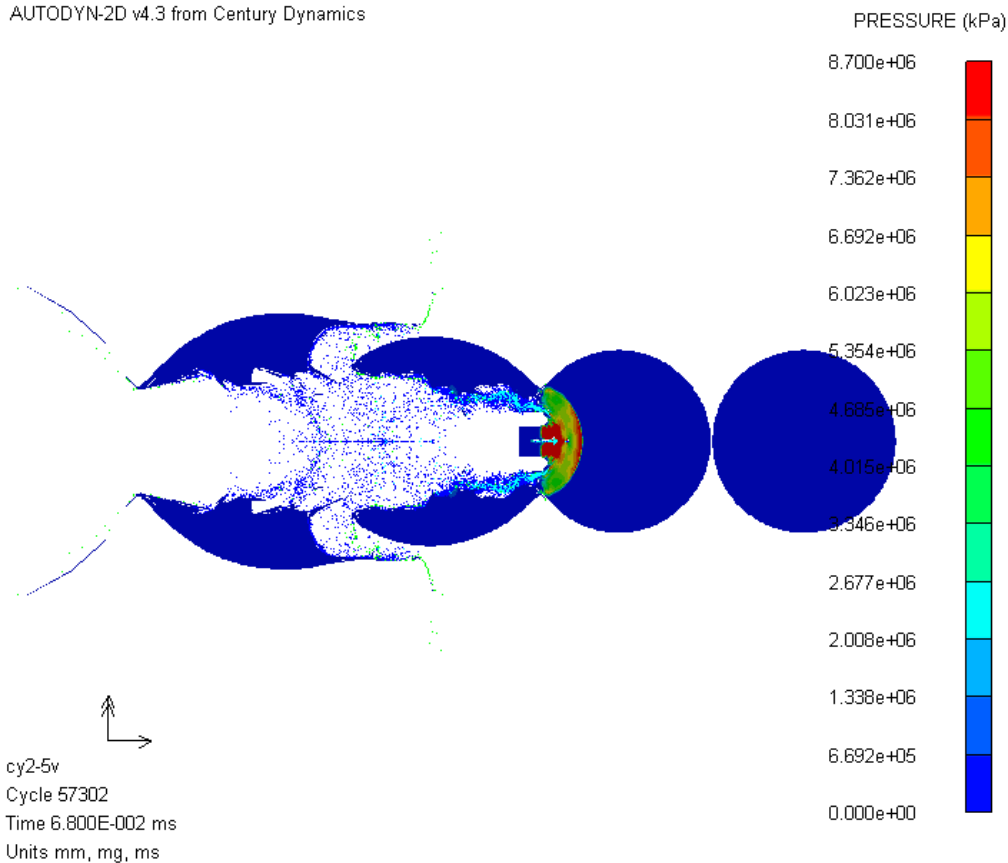
AUTODYN-2D v4.3 from Century Dynamics



Figur 24: Tryck vid penetration av två behållare (sfärisk projektil).

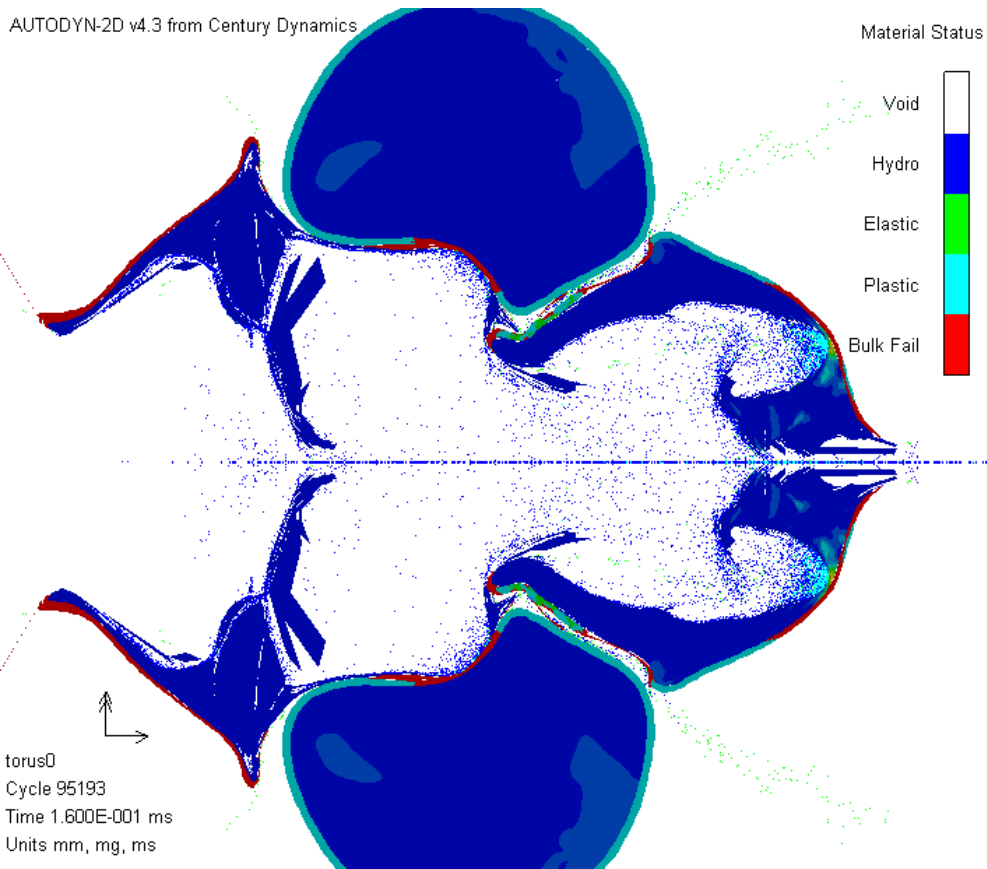
I Figur 25 visas en del av förloppet då fyra behållare träffas av en cylindrisk WHA-projektil ($L/D=5$, $D=20$ mm) med hastigheten 5 km/s (ej sluttilstånd). Simulering visar att alla fyra behållarna penetreras och sannolikheten är mycket stor att även skalet på en femte behållare, liggande i skottlinjen, skulle kunna punkteras. Den långa projektilen gör i detta fall att det tar betydligt längre tid innan hela projektilen har förbrukats, vilket gör att flera behållare kan penetreras. I detta fall träffar projektilen utan attitydvinkel. I verkliga fall kan projektilen träffa med en godtycklig attitydvinkel vilket försämrar penetrationsförmågan.

AUTODYN-2D v4.3 from Century Dynamics



Figur 25: Tryck vid penetration av fyra behållare (cylindrisk projektil)

I Figur 26 visas en del av förloppet då två sfäriska behållare träffas, precis som i Figur 24 (sfärisk WHA-projektil). Skillnaden är nu att modellen även innehåller en omgivande torusring, för att efterlikna den ring av sfäriska behållare (ca 5 st) som ligger intill de två sfäriska behållarna som penetreras. I figuren visas materialets status, det vill säga om det är elastiskt, plastiskt eller fragmenterat (bulk fail). Det framgår att större delen av torusringens mantel har plasticerats. Det finns även en liten del av manteln i torusringen som har fragmenterat, vilket gör att vätskan i behållaren kan läcka ut.



Figur 26: Materialstatus vid penetration av två sfäriska behållare plus en omgivande torusring.

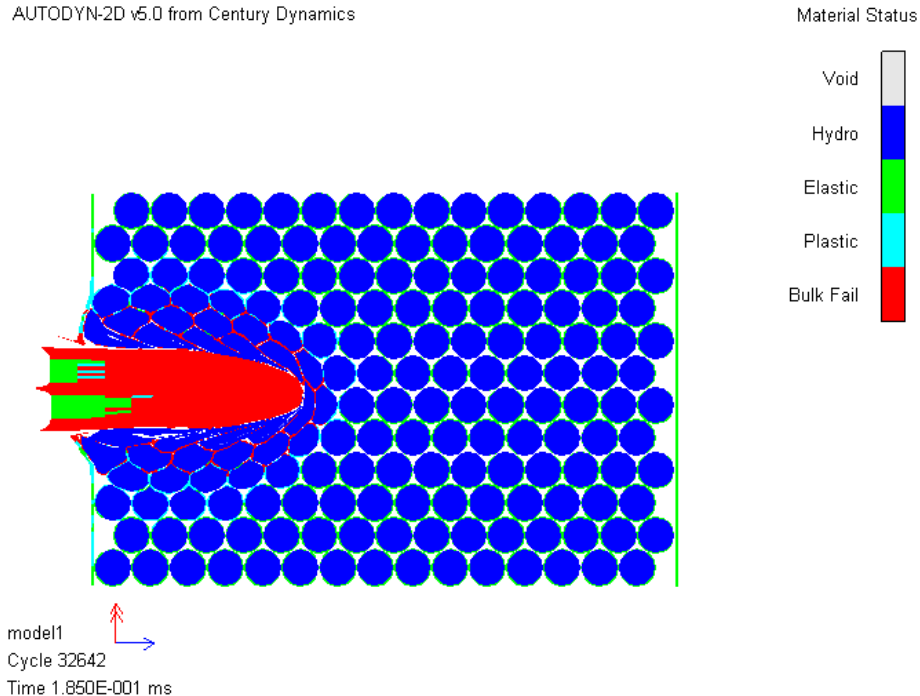
Maxtrycket i torusringen blir ca 0.6 GPa, vilket är ganska lågt. Med den stora volym som torusringen innehåller är det dock inte förvånande att trycket blir lågt. Det är troligt att trycket skulle bli något högre om torusringen skulle ersättas av flera (ca 5 st) sfäriska behållare. För en sådan simulering krävs dock en 3-D simulering, vilken i princip är möjlig, men väldigt tidskrävande.

7.5 Verkan av direktträffande stridsdel

Slutligen gjordes en simulering av en direktträffande robot. Denna simulering gjordes dock i 2-D, under plan deformation. Avsikten var att studera hur många behållare med stridsmedel som går sönder. Modellen bestod i detta fall av 150 stycken behållare med samma dimension som förut, dvs. ytterdiameter 120 mm och godstjocklek 3 mm. Framför och bakom behållarna placerades 10 mm tjocka stålplåtar för att efterlikna ytterhöljet. Roboten var homogen och hade i detta fall en ogival spetsform, diametern var 250 mm och bestod av kerammaterialet AL203-99.5 med materialdata från AUTODYNS materialbibliotek. Anslagshastigheten var 5 km/s. För att möjliggöra denna simulering var det nödvändigt att minska antalet celler för varje behållare.

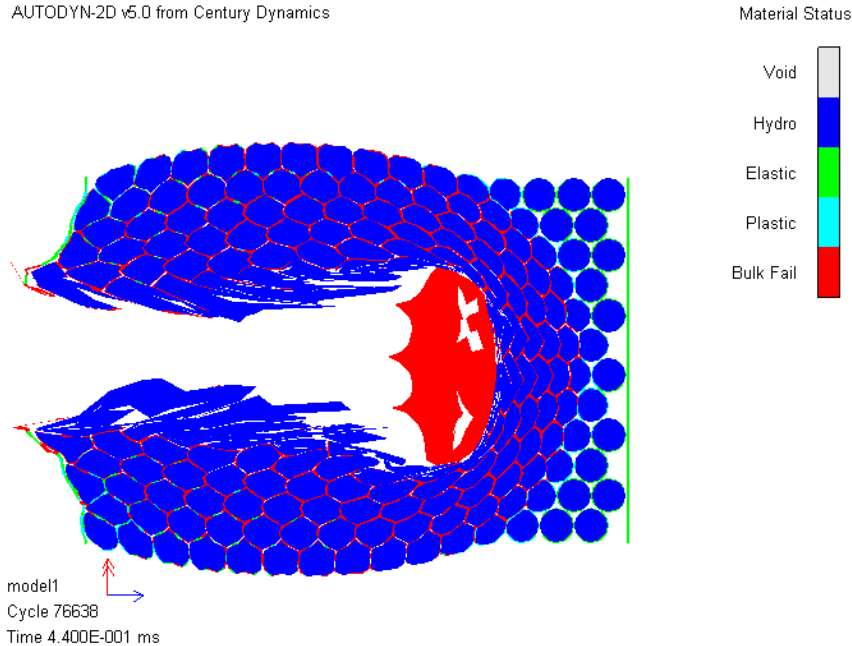
I figurerna nedan visas förloppet vid tre efterföljande tidpunkter.

AUTODYN-2D v5.0 from Century Dynamics



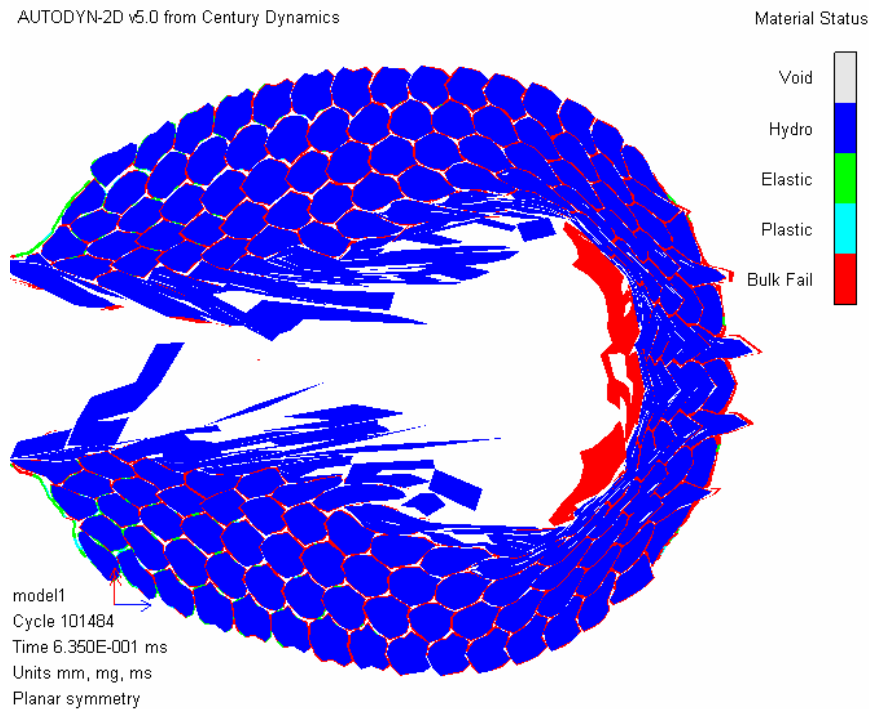
Figur 27: Direktträffande robot, t = 0.18 ms

AUTODYN-2D v5.0 from Century Dynamics



Figur 28: Direktträffande robot, t = 0.44 ms

AUTODYN-2D v5.0 from Century Dynamics



Figur 29: Direktträffande robot, $t = 0.63$ ms

Det framgår av Figur 29 att alla behållare fragmenteras. I figuren är robothastigheten ca 3 km/s, följaktligen finns en stor del av rörelseenergin kvar. Detta innebär att roboten även kommer att penetrera den bakre plåten. Denna simulering indikerar således att ett område som är minst ca 5 gånger större än robotens diameter förstörs.

7.6 Sammanfattning simuleringar

Trycket i den första behållaren som träffas, blir i allmänhet så högt att hela behållaren exploderar. I de därpå följande behållare som penetreras blir däremot trycket lägre.

Simuleringarna visar att en sfärisk WHA-projektil ($D=20$ mm) med hastigheten 5 km/s penetrerar de två behållare som ligger i skottlinjen. Sannolikt kommer även en tredje bakomliggande behållare att punkteras så att vätskan rinner ut. För de omgivande sfärerna visar simuleringen med en torusring att troligen kommer ca 5 stycken sfärer att punkteras. Totalt kan alltså ca 8 stycken sfärer punkteras.

En cylindrisk WHA-projektil ($L=100$ mm, $D=20$ mm) med hastigheten 5 km/s kommer att penetrera fyra stycken behållare som ligger i skottlinjen. Med stor sannolikt kommer även den femte behållaren att punkteras. För de omgivande behållarna kommer troligen ca $3 \cdot 5 = 15$ stycken att punkteras. Totalt kan därmed ca 20 behållare punkteras. En lång cylindrisk projektil ger därmed under ideala förhållanden mer än dubbelt så bra utdelning som en sfärisk projektil. Vikten är dock betydligt större.

Vid en direktträff visar förenklade simuleringar att behållare förstörs i ett område som är minst ca 5 gånger större än robotens diameter.

8 Diskussion

De i denna rapport studerade frågorna är främst inriktade på slutfasen vid en bekämpning, dvs. interaktionen mellan vapnets stridsdel och mål. Flera frågor kvarstår och fördjupade studier inom de områden som här belyses är också nödvändigt. Nedan diskuteras förslag på fortsatt arbete och några viktiga kunskapsluckor belyses.

I denna studie har penetrations- och perforationsförloppet vid höga hastigheter beskrivits utifrån en litteraturstudie. Denna studie har främst fokuserat på förståelse av själva penetrationsförloppet. De områden där de största kunskapsluckorna finns är främst vilka effekter smältning och förångning får på substridsdelar och/eller andra komponenter inuti roboten. Huruvida det finns möjlighet att slå ut dessa och vilka förutsättningar som i så fall krävs för detta är några av många intressanta frågeställningar. Beroende på ambitionsnivå skulle vidare arbete dels kunna bestå i fördjupade litteraturstudier men med ambition till en mer djupgående förståelse krävs egna slutballistiska experiment. Resurser som finns och krävs för detta belyses utförligt i [4].

Splitter-simuleringarna i AVAL visar på de stora krav som ställs på ett bekämpningsvapens sensorer och tändsystem. För att på ett mer heltäckande sätt studera dessa frågor skulle simuleringar med mer övergripande luftvärnsprogram av typen SILVIA [54] eller liknande kunna genomföras. Resultatet från simuleringarna används sedan som indata till AVAL där tändsystem och stridsdel värderas. Andra typer av splitterstridsdelar eller penetrerande verkansdelar, t.ex. riktade splitter, stavar eller liknande, är fullt möjligt att värdera i AVAL. Studierna får bli av den typ som här genomförts, där läge, antal och liknande undersöks, eftersom det inte är möjligt att värdera hela penetrationsförloppet vid de höga hastigheter som här är aktuella. För att i AVAL kunna genomföra kompletta värderingar, av den typ som görs av vanliga system, krävs utökad underlag och ökad förståelse av interaktionsprocesserna vid höga hastigheter. AUTODYN-simuleringarna visade på att behållare som ligger intill den behållare som träffas kan skadas men i dagsläget finns ingen möjlighet att i AVAL ta hänsyn till denna volymsverkan. För att detta ska bli möjligt behövs en modell för fenomenet samt en implementering i AVAL.

För att minska beräkningstiden har alla AUTODYN-simuleringarna genomförts i 2-D. Om en mer noggrann studie ska göras av effekten på kringliggande behållare krävs 3-D simuleringar. Beräkningstiden för att simulera en direktträffande stridsdel är lång även i 2-D. Simuleringar borde även genomföras vid snett infall och för träffar i kanten. Inga simuleringar har genomförts mot behållare med en torr agens, för att representera t.ex. antraxsporer. För att detta ska kunna genomföras krävs att en materialmodell definieras. Även för BC-medel i vätskeform krävs exaktare materialmodeller. För att kunna prediktera storlek, hastighet och riktning på delar från söndersplittrade behållare är defektfördelningar av stort intresse. Simulering med defektfördelning kräver fördjupade studier. Verksamhet inom området pågår på FOI, se t.ex. [55]

Den kanske viktigaste frågan, som i denna rapport lämnas obesvarad, kvarstår. Vad är restverkan från en bekämpad ballistisk robot? Några centrala frågor som kvarstår för att kunna bedöma restverkan och som även belyses i [4] är:

- Vad händer med BC-agenser när de utsätts för de höga och kortvariga tryck som uppstår då BC-behållare träffas? Förstörs de eller klarar de sig?
- Hur sprids olika typer av vätskor vid de korta och snabba förlopp som här är aktuella? Hur påverkar atmosfärstryck och hastighet spridningen?

Om inte restverkan kan bedömas är det inte möjligt att dra slutsatser om ett bekämpningssystem är framgångsrikt eller ej. Ska t.ex. alla substridsdelar slås sönder eller riskerar detta att förvärra spridningen

mot om roboten inte bekämpades? Är det bättre att försöka slå sönder robotens tändsystem så att endast ett litet område kring nedslagsplatsen riskerar att förorenas?

Framtida studier borde även innefatta verkan i kärnvapen samt konventionella stridsdelar.

9 Sammanfattning

För att kunna värdera verkan i ballistiska robotar måste nya fenomen och förlopp. Det som främst särskiljer värdering av verkan i ballistiska robotar är de höga relativa hastigheterna mellan vapen och mål samt de ofta unika utformningarna på både mål och bekämpningsvapen.

I denna rapport ges en översiktlig beskrivning av ballistiska robotar, olika typer av stridsdelar samt system för bekämpning. Rapporten redovisar en inledande studie av några av de förlopp som för denna typ av mål ofta är unika. Följande fall har studerats genom litteraturstudier, simuleringar och beräkningar:

- Höga hastigheters inverkan på penetrationsförloppet.
- Hur höga relativa hastigheterna påverkar möjligheten för användning av ordinära splitterstridsdelar.
- Hur vätskefyllda behållare påverkas när de träffas av olika typer av projektiler.

Vid höga hastigheter uppstår penetrationsfenomen som skiljer sig från penetration vid ordinära hastigheter. Dessa fenomen kan resultera i att projektil och målmaterial fragmenteras, smälter och förångas. Den bakomliggande effekten blir störst vid fragmentering där restpenetration är möjlig. Vid smältning och förångning blir det sekundäreffekter i form av tryck och temperaturökningar. Vid fragmentering är långa slanka projektiler mest effektivt vad gäller bakomliggande effekt. Långa slanka projektiler har också den fördelen att endast framändan konsumeras vid passage av tunna plåtar medan resten av projektilen fortsätter som en stel kropp och på så sätt kan nå längre in i målet. Slanka projektiler är dock beroende av orienteringen vilket den mindre effektiva sfäriska projektilen inte är. Bra materialegenskaper hos projektilen är bland annat hög densitet och hög smältpunkt.

För att med en splitterstridsdel kunna erhålla verkan i ett mål som rör sig med en hastighet som är större än splitterutkastningshastigheten ställs stora krav på vapnets styrning, sensorer och tändsystem. Vid frontalt infall mellan vapen och mål är området där brisad leder till splitterträff väldigt smalt och relativt kort. Vid snett infall råder samma begränsningar men dessutom måste målets framtida bana predikteras eftersom brisaden måste ske i ett område som är förskjutet utifrån den relativa hastigheten mellan vapen och mål.

För att kunna bekämpa ett mål med substridsdelar i form av behållare med BC-agens, ställs stora krav på bekämpningsvapnets stridsdel. Korta och knubbiga splitter eroderas vid de höga hastigheter som här förekommer och kan därför inte skada behållare som ligger djupt i målet. Med långa slanka projektiler blir djupverkan möjlig men projektilernas orientering måste vara relativt optimal för att detta ska ske. Ett vapen som verkar genom direkträff har potential att förstöra alla substridsdelar om det träffar optimalt.

10 Referenser

- [1] Försvarsberedningen, *Säkrare grannskap - osäker värld*, s. 180, 2003, Ds 2003:08
- [2] E. Tarras-Wahlberg, E. Sjöberg m fl, *Skydd mot ballistiska robotar*, FOA-R--95-00136-1.1,1.2--SE, Nov 1995
- [3] M.B. Hansson och E. Tarras-Wahlberg (redaktörer), *Luftvärnsskydd mot kryssningsrobotar och ballistiska robotar med begränsad räckvidd (TSA-LV)*, FOA-R--98-00898-170--SE, Dec 1998.
- [4] L. Holmberg, *Inledande studie av möjligheterna att bekämpa stridsdelar till ballistiska robotar*, FOI-R--0729--SE, Dec 2002.
- [5] FAS, UR-100N / SS-19 STILLETTO, <www.fas.org/nuke/guide/russia/icbm/ur-100n.htm>, 2004-06-17
- [6] FAS, LGM-118A Peacekeeper, <www.fas.org/nuke/guide/usa/icbm/lgm-118.htm>, 2004-06-17
- [7] U.S. Congress Office of Technology Assessment, *Technologies Underlying Weapons of Mass Destruction*, OTA-BP-ISC-115, December 1993
- [8] FAS, Chemical Weapon Delivery, <www.fas.org/nuke/intro/cw/deliver.htm>, 2004-06-17
- [9] Vapenverkan, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, ISBN 91-38-07932-1
- [10] FAS, RT-23 / SS-24 SCALPEL, <www.fas.org/nuke/guide/russia/icbm/rt-23.htm>, 2004-06-01
- [11] UR-500 / [Proton], <www.fas.org/nuke/guide/russia/icbm/ur-500.htm>, 2004-06-01
- [12] FAS, Ballistic Missile Basics, <www.fas.org/nuke/intro/missile/basics.htm>, 2004-06-17
- [13] FAS, Midcourse Defense, <www.fas.org/ssp/bmd/guide/midcourse.htm> 2004-06-06
- [14] Sessler A. M. m.fl., *Countermeasures A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the Planned US National Missile Defense System*, Union of Concerned Scientists, MIT Security Studies Program, April 2000
- [15] FAS, Ground Based Interceptor [GBI], <www.fas.org/spp/starwars/program/gbi.htm>, 2004-06-11)
- [16] Missile Defense Agency, Midcourse Defense Segment, <www.acq.osd.mil/bmdo/bmdolink/html/midcrse.html>, 2004-06-11
- [17] FAS, Terminal Phase Defense, <www.fas.org/ssp/bmd/guide/terminal.htm> 2004-06-11
- [18] J. Daniel Sherman, *Patriot PAC-2 Development and Deployment in the Gulf War*, Acquisition Review Quarterly, Winter 2003
- [19] Jane's Strategic Weapon Systems, Issue 40, January 2004
- [20] Jane's Land-Based Air Defence, 2001-2002
- [21] Patrick O'Reilly and Ed Walters, *The Patriot PAC-3 Missile Program – An Affordable Integration Approach*, PATRIOT Project Office & Lockheed Martin Vought Systems, ADA319957
- [22] FAS, Patriot TMD, <www.fas.org/spp/starwars/program/patriot.htm>, 2004-06-17
- [23] Iraq's Scud Ballistic Missiles Information Paper, Department of Defense Special Assistant for Gulf War Illnesses, July 25, 2000, <www.iraqwatch.org/government/US/Pentagon/dodscud.htm>, 2004-06-17
- [24] Theodore A. Postal., *Optical Evidence Indicating Patriot High Miss Rates During the Gulf War*, Committee on Government Operations, Subcommittee on Legislation and National Security, April 7, 1992, <www.fas.org/spp/starwars/congress/1992_h/h920407p.htm>, 2004-06-17
- [25] George N. Lewis and Theodore A. Postal, *Technical Debate over Patriot Performance in the Gulf War: American Physical Society Panel Correctly Rejects Criticism of Analysis Showing Patriot Failed to Destroy Scud Warheads*, Science & Global Security, Vol. 8 (2000), pp. 316-356.
- [26] FAS, Missiles - Iraq Special Weapons, <www.fas.org/nuke/guide/iraq/missile/index.html>, 2004-06-17
- [27] R. M Loyd, *Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 179, 1998.
- [28] R. M Loyd, *Physics of Direct Hit and Near Miss Warhead Technology*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 194, 2001.
- [29] Hohler, V. and Stilp, A.J., *Hypervelocity impact of rod projectiles with L/D from 1 to 32*. International Journal of Impact Engineering, 1987. 5: p. 323-331.
- [30] Hohler, V. and Stilp, A.J., *Penetration of steel- and high density rods in semi-infinite steel targets*, Proc. Third Int. Symp. on Ballistics, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, H3, 1977
- [31] Chartes, A.C. and Summers, J.L. *High speed impact of metal projectiles in targets of various materials*, 3rd Symposium on Hypervelocity impact, 1959. Armour research foundation, Chicago, Illinois.
- [32] Backman, M.E. and Goldsmith, W., *The mechanics of penetration of projectiles into targets*. International Journal of Engineering Science, 1978. 16(1): p. 1-99.
- [33] Bjork, R.L. and Olshaker, A.E., *The role of melting and vaporization in hypervelocity impact*, Memorandum RM-3490-PR, 1965
- [34] Swift, H.F. and Hopkins, A.K., *The effects of bumper material properties on the operation of spaced hypervelocity particle shields*, Air Force Materials Laboratory, Report AFML-TR-68-257, 1968
- [35] Nysmith, C.R. and Denardo, B.P., *Experimental investigation of the momentum transfer associated with impact into thin aluminium targets*, NASA, Technical note D-5492, 1969
- [36] Morrison, R.H., *A preliminary investigation of projectile shape effects in hypervelocity impact of a double-sheet structure*, NASA, TN D-6944, 1972
- [37] Andersson, C.E., et al., *A short course on penetration mechanics*: Southwest research institute.

- [38] Baker, J.R. and Williams, A., *Hypervelocity penetration of plate targets by rod and rod-like projectiles*. International Journal of Impact Engineering, 1987. **5**: p. 101-110.
- [39] Chandler, R.L. and Watmough, T. *The role of projectile material properties in the hypervelocity penetration of thin plates*. in *The Seventh Hypervelocity Impact Symposium, VII- Applications*, 1964. Tampa, Florida.
- [40] Nagaoka, H.H. and Watmough, T., *Projectile physical properties investigation*, AFATLT-R-67-228, 1967
- [41] Clough, N., Lieblein, S., and Mcmillan, A.R., *Dimple, spall and perforation characteristics of thin plates of nine materials under hypervelocity impact*, NASA Lewis research center, NASA TN D-5625, 1970
- [42] Bless, S.J., Rosenberg, Z., and Yoon, B., *Hypervelocity penetration of ceramics*. International Journal of Impact Engineering, 1987. **5**: p. 165.
- [43] Rosenberg, Z., et al., *Hypervelocity penetration of tungsten alloy rods into ceramic tiles: experiments and 2-D simulations*. International Journal of Impact Engineering, 1997. **20**(6-10): p. 675-683.
- [44] Orphal, D.L. and Franzen, R.R., *Penetration of confined silicon carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 4.6 km/s*. International Journal of Impact Engineering, 1997. **19**(1): p. 1-13.
- [45] Orphal, D.L., et al., *Penetration of confined aluminum nitride targets by tungsten long rods at 1.5–4.5 km/s*. International Journal of Impact Engineering, 1996. **18**(4): p. 355-368.
- [46] Orphal, D.L., et al., *Penetration of confined boron carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 5.0 km/s*. International Journal of Impact Engineering, 1997. **19**(1): p. 15-29.
- [47] Zilberbrand, E.L., et al., *Failure Wave Effects in Hypervelocity Penetration*. International Journal of Impact Engineering, 1999. **23**(1): p. 995-1001.
- [48] Baker, J.R., *Rod lethality studies*, Naval research laboratory, NRL Report 1969
- [49] Condon, J.J., *Rod lethality studies*, Naval research laboratory, NRL ALT-TR-65-18, 1965
- [50] Condon, J.J. and Baker, J.R., *Annual technical progress report on rod lethality studies*, Naval research laboratory, NRL Memorandum Report 18092, 1967
- [51] C. E. Anderson, V. Hohler, J. D. Walker, A. J. Stilp, *Time-resolved penetration of long rods into steel targets*, Int. J. of Impact Engng vol. 16, no. 1, pp 1-18, 1995.
- [52] P. Skoglund, *Constitutive modelling and mechanical properties of a tungsten heavy metal alloy*, FOI-R--0723--SE, 2002.
- [53] M. Gerassimenko, *Modelling of measured target pressure profiles in three hypervelocity impact experiments*, Int. J. of Impact Engng., vol. 26, pp. 221-230, 2001.
- [54] Hansson M-B., *Erfarenheter från användningen av värderingsmodellen SILVIA*, FOA-R--97-00559-202--SE, 1997
- [55] Olovsson L., Unosson M., *KRYP, ett finita elementprogram för kristallplasticitet.*, FOI-R--0551--SE, 2002
- [56] Anderson C. E., Sharron T. R., Walker J. D., Freitas C. J., *Simulation and analysis of a 23-mm HEI projectile hydrodynamic ram experiment*, Int. J. of Impact Eng., 22 (1999) 981-997.

Bilaga 1

Flytspänning för WHA ges av Johnson-Cooks materialmodell

$$Y(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \left[A + B\varepsilon^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right]$$

där A, B, n, C, m och T_{melt} är materialparametrar som ges av tabellen nedan.

Materialparametrar för WHA.

A	1.15 GPa
B	0.177 GPa
n	0.12
C	0.016
$\dot{\varepsilon}_0$	1.0
m	1
T_{melt}	1723 K
T_{ref}	293 K
Skjuvmodul G	124 GPa
Brottöjning ε_f	20 %
Densitet	17600 kg/m ³

Tillståndekvationen (EOS) för vatten ges av Mie-Gruneisens ekvation. Där trycket (p) i vattnet som funktion av densiteten (ρ) ges av

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H)$$

där

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{\mu + 1} \right),$$

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{(1 - (s - 1)\mu)^2},$$

och

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1.$$

Materialdata enligt [56] är $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c_0 = 1480 \text{ m/s}$, $s = 1.984$, $\Gamma = 0.48$.