



# Metodik och verktyg för bedömning av genomslagsförmåga hos RSV-stridsdelar

FREDRIK BULTMARK, BO JOHANSSON

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
Försvars- och säkerhetssystem  
164 90 Stockholm

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

[www.foi.se](http://www.foi.se)

FOI-R--2856--SE Metodrapport  
ISSN 1650-1942 December 2009

**Försvars- och säkerhetssystem**

Fredrik Bultmark, Bo Johansson

# Metodik och verktyg för bedömning av genomslagsförmåga hos RSV- stridsdelar

Titel  
Title  
Metodik och verktyg för bedömning av genomslagsförmåga hos RSV-stridsdelar  
Methods and tools for estimation of shaped charge penetration

Rapportnr/Report no  
FOI-R--2856--SE

Rapporttyp  
Report Type  
Metodrapport

Sidor/Pages  
14 p

Månad/Month  
December

Utgivningsår/Year  
2009

ISSN  
ISSN 1650-1942

Kund/Customer  
Försvarmakten

Kompetenskloss  
6 Skydd - fortifikatoriskt

Extra kompetenskloss

Projektnr/Project no  
E20511

Godkänd av/Approved by  
Patrik Lundberg

FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut

FOI, Swedish Defence Research Agency

Avdelningen för Försvars- och säkerhetssystem  
164 90 Stockholm

Defence & Security, Systems and Technology  
SE-164 90 Stockholm

## Sammanfattning

En grundläggande förmåga vid militära operationer är att kunna skydda fasta anläggningar, fältbefästningar och rörliga militära förband mot inkommande hot. RSV-stridsdelar utgör i detta sammanhang ett mycket allvarligt hot på grund av den stora penetrationsförmågan.

I den här rapporten beskrivs några verktyg som kan användas för att uppskatta penetrationen av en RSV-stråle i enkla och skiktade mål.

För att kunna beräkna penetrationsförmågan behöver tre skeenden behandlas:

- . Strålbildning
- . Strålens (eventuella) fragmentering
- . Strålens eller strålfragmentens penetration

I rapporten diskuteras hur de olika programmen behandlar de olika skeendena och problem relaterade till dessa.

En av slutsatserna är att de verktyg som finns idag kan användas för att uppskatta penetrationen av verkliga såväl som fiktiva stridsdelar mot mål bestående av ett eller flera material. För att säkerställa att de teoretiska resultaten är tillförlitliga behöver ett större experimentellt underlag sammanställas och dessa data används för att hitta de lämpligaste parametrarna för respektive stridsdel och målmaterial.

Nyckelord:

RSV, riktad sprängverkan, strålbildning, fragmentering, penetration, RSV1D, HIPEN, LS-DYNA, GRALE

## Summary

A fundamental ability during military operations is to be able to protect facilities, field fortifications and mobile military units and attacking threats. Shaped charges in this pose a serious threat due to their high penetrative capacity.

In this report some tools that can be used to estimate the penetration of single or multilayered targets are described.

To access the penetrative capability three stages needs to be dealt with:

- . Jet formation
- . Jet fragmentation (if any)
- . Penetration of the jet or jet fragments

In the report programs and analytical tools to describe the stages are presented and the way they treat the related problems is discussed.

One of the conclusions is that the existing tools are capable of estimating the penetration of both real and fictitious shaped charges in targets composed of one or more materials. To certify the validity of the theoretical results a comparison to a larger set of experimental results is needed, and these results may also be used to find the most suitable values of the empirical parameters included in the models for shaped charge jet formation, fragmentation and penetration.

Keywords:

SC, Shaped charge, jet formation, fragmentation, penetration, RSV1D, HIPEN, LS-DYNA, GRALE

# Innehållsförteckning

Inledning	7
Strålbildning	8
Fragmentering	9
Penetration	10
Slutsatser	12
Framtida arbete	13
Referenser	14



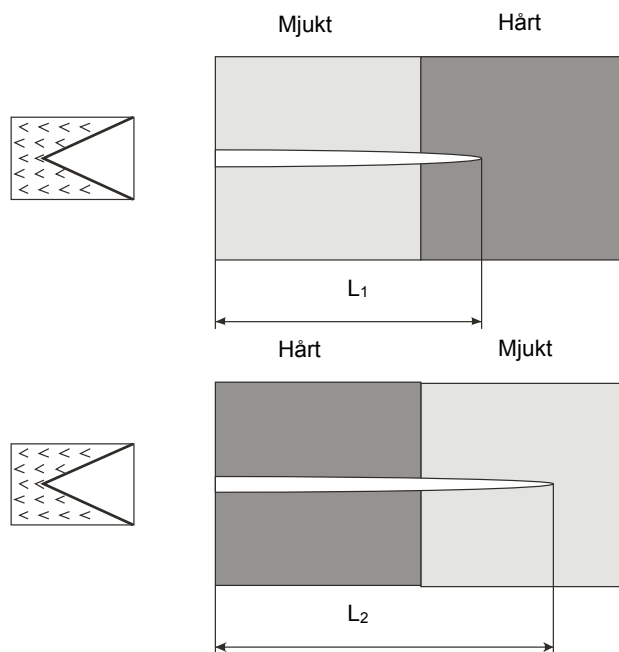
## Inledning

En grundläggande förmåga vid internationella operationer är att kunna skydda fasta anläggningar, fältbefästningar och rörliga militära förband mot inkommande hot. RSV-stridsdelar utgör i detta sammanhang ett mycket allvarligt hot på grund av den stora penetrationsförmågan. För att erhålla ett balanserat skydd kan handböcker, olika typer av försök och experiment eller olika typer av numeriska eller analytiska modeller användas.

Penetration av RSV-strålar i olika material och materialkombinationer som ingår i skyddstäckningar har varit föremål för flera studier. Elfving m fl [1] redovisar en sammanställning av några tidigare försök rörande RSV. Dessa samt en del kompletterande försök finns redovisade i en rapport av Hansson och Westerling [2]. I [2] redogörs även för några av de modeller för strålbildning och penetration som finns beskrivna i litteraturen.

Enligt Hansson och Westerling bör en penetrationsmodell för RSV kunna hantera penetration i skyddskonstruktioner med ett eller flera skikt av olika material. Det är sedan tidigare känt att penetrationen i ett skiktat mål beror av den ordning de hårda respektive mjuka skikten är ordnade, se Figur 1. Hur stor den totala penetrationen blir bestäms av strålens och målets materialegenskaper.

I den här rapporten beskrivs några verktyg som kan användas till att uppskatta penetrationen av en RSV-stråle i enkla och skiktade mål.

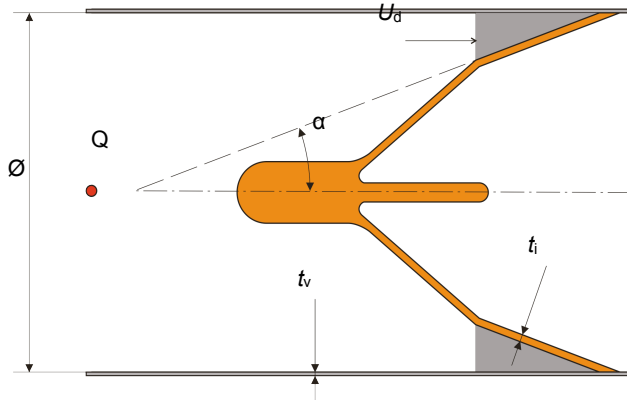


Figur 1. Principskiss över skillnaden i total penetrationen beroende av skiktens inbördes ordning. Skikten antas ha samma densitet.



## Strålbildning

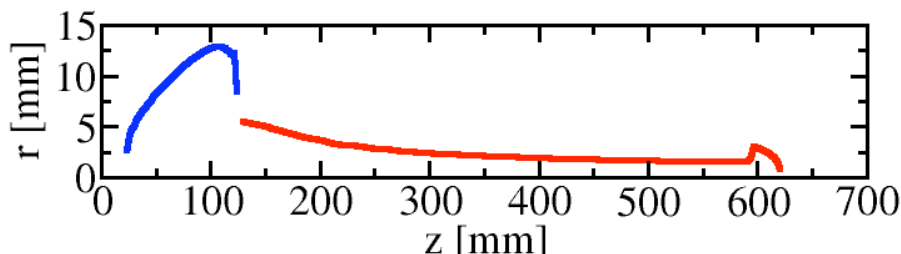
Det finns analytiska modeller som beskriver hur strålen bildas då explosivämnet initieras i en stridsdel. Flera av dessa finns implementerade i ett beräkningsverktyg, RSV1D, framtaget av Leikvik [3]. En annan möjlighet är att simulera strålbildningen i finita element-program som LS-DYNA [4] eller GRALE [5]. I båda fallen blir strållängden, massan och hastighetsfördelningen ofta väl beskriven jämfört med experiment [6, 7].



Figur 2. Principskiss av inläggets kollaps. Laddningsdiameter  $\emptyset$ , konvinkel  $\alpha$ , inläggets tjocklek  $t_i$ , laddningshöljets tjocklek  $t_v$ , detonationshastighet  $U_d$  samt initieringspunkt  $Q$ .

Då explosivämnet i stridsdelen initieras propagerar en detonationsvåg genom explosivämnet, se Figur 2. När vågen når inlägget trycks detta med hög hastighet in mot symmetriaxeln. Vid symmetriaxeln kolliderar materialet från inlägget och en del av materialet kastas framåt i hög hastighet och bildar strålen. Strålspetsens hastighet kan - på grund av inläggets form - vara större än detonationshastigheten. En del av inlägget bildar den så kallade sluggen. Sluggen rör sig framåt med lägre hastighet än strålen och bidrar i regel inte till penetrationen. I vissa försök med låghållfasta målmaterial har sluggen återfunnits i botten av hållkanalen [8] och sluggen kan alltså under vissa omständigheter ge ett bidrag till penetrationen.

Det finns analytiska samband som kan användas till att få information om strålen och sluggen utifrån geometriska storheter och materialegenskaper för stridsdelen, se Figur 3. Till dessa beräkningar behövs endast geometriska storheter och materialparametrar för explosivämne, inlägg och eventuellt laddningshöljet [3]. Detta innebär att det finns goda möjligheter att förutsäga strållängd, massa och hastighetsfördelning som funktion av tid, även för stridsdelar där experimentella data saknas. Till exempel kan beräkningar ge svar på hur strålarna kommer att se ut från helt fiktiva stridsdelar som ännu inte tillverkats. Strålbilningskoden RSV1D hanterar idag endast stridsdelar med koniska inlägg. Koden kan enkelt modifieras för att hantera inlägg med annan form.



Figur 3. Simulering av strålbildning i RSV1D. Radien  $r$  mot avståndet längs symmetriaxeln  $z$  räknat från konspetsen före detonation. Strålen visas i rött och sluggen i blått.

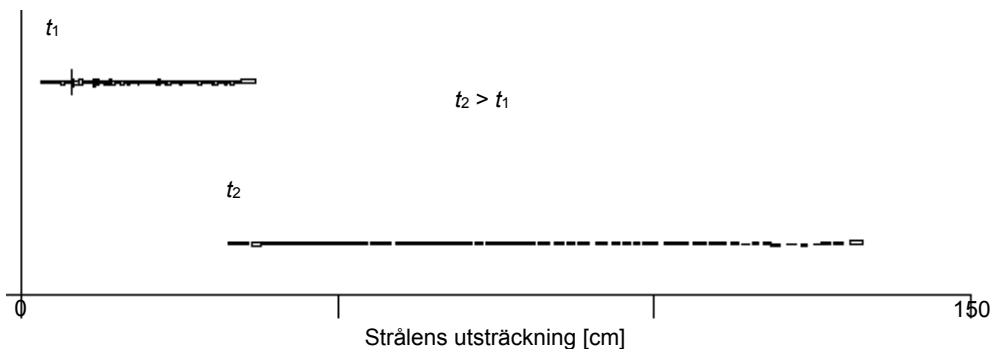
## Fragmentering

Den främre delen av strålen rör sig med större hastighet än den bakre och detta leder till att strålen sträcks. Efter en tid kommer strålen att ha delats i ett antal fragment. Det finns flera modeller för fragmentering av RSV-strålar. Flera av dessa presenteras i Walters och Zukas [9].

Strålar från kopparinlägg - det vanligast förekommande materialet för inlägg i RSV-stridsdelar - fragmenterar ofta förhållandevis sent, dvs då den färdats en längre sträcka. Vid normala standoff (avståndet mellan laddning och mål vid initiering) hinner strålen penetrera det mesta av målet innan den fragmenterar. För att bestämma den maximala penetrationen behövs därför i regel ingen fragmenteringsmodell.

I strålbildningskoden RSV1D finns ingen fragmenteringsmodell implementerad. Strålen som bildas fortsätter sträckas till dess simuleringen avslutas.

I penetrationskoden HIPEN [10] finns heller ingen generell fragmenteringsmodell implementerad utan för att beräkna penetrationen vid stora standoff behöver koden som indata känna till hur den fragmenterade strålen ser ut. För att generera denna typ av indata används därför ofta information från röntgenbilder av fragmenterade strålar. Koden stegar sedan baklänges i tiden och sätter samman fragmenten till en kontinuerlig stråle, se Figur 4.



Figur 4. Bild av en stråle från HIPEN. Röntgenbilden är tagen vid tiden  $t_2$ . Koden stegar baklänges i tiden och sätter samman fragmenten till en kontinuerlig stråle vid tiden  $t_1$ .

## Penetration

I FortH 1 (Fortifikationshandbok del 1) [11] redovisas en modell för penetration,  $P$ , av RSV-stråle i material eller materialkombinationer som ingår i skyddstäckningar

$$P = k \times \emptyset, \quad (1)$$

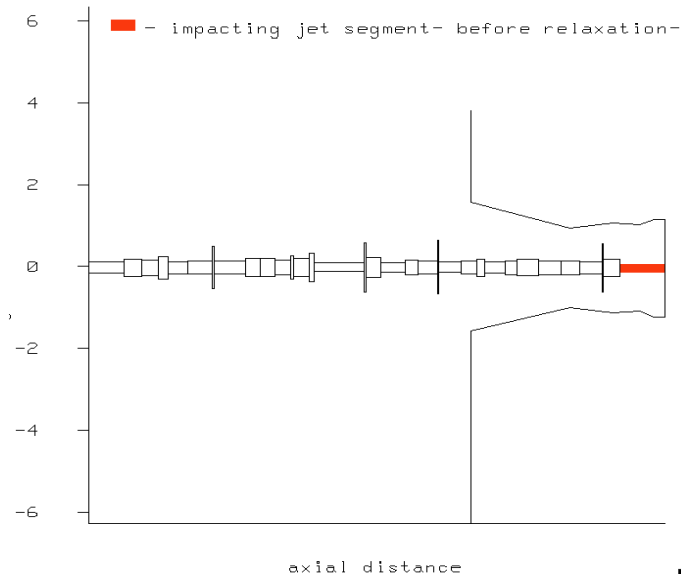
där  $k$  beror av både strålens och målets egenskaper och  $\emptyset$  är laddningens kaliber. I sin enklaste form bestäms  $k$  enbart av målmaterialet. I [11] anges  $k$  för berg till 7 och för betong till 10. Detta antagande är en stark förenkling då olika stridsdelar med samma kaliber kan ge olika penetration i ett och samma målmaterial.

I ett försök att åstadkomma en mer flexibel modell föreslog Elfving m fl [1] en variant baserad på Bernoullis ekvation [9],

$$P = k_1 k_2 \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_m}} \times \emptyset, \quad (2)$$

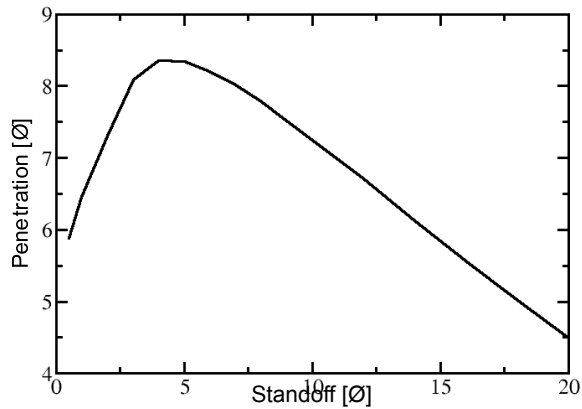
där  $\rho_s$  och  $\rho_m$  är strålens respektive målets densitet och  $k_1$  och  $k_2$  är stridsdels- respektive målberoende parametrar. Även denna modell är starkt förenklad, då det inte går att hitta en uppsättning parametrar  $k_1$  och  $k_2$  som korrekt beskriver penetrationen i alla kombinationer av stridsdelar och mål.

I penetrationskoden HIPEN används en modell, som baseras på Bernoullis ekvation, föreslagen av Eichelberger [12], där även materialens hållfasthetsegenskaper ingår. På grund av att hållfastheten ingår blir penetrationen beroende av den hastighet det penetrerande fragmenten har. Som tidigare nämnts varierar hastigheten längs strålen. HIPEN betraktar strålen som uppdelad i ett antal element och beräknar bidraget till penetrationsdjupet från det element som just träffar hållkanalens botten, se Figur 5. Genom att stega sig igenom penetrationsprocessen kan koden ta hänsyn till att strålens penetrationsförmåga varierar. Dessutom är det möjligt att beräkna penetrationen i skiktade mål där materialegenskaperna varierar.



Figur 5. HIPEN stegar sig fram i tiden till den tidpunkt då nästa fragment på tur når hållkanalens botten. Därefter beräknas hur mycket djupare hålet blir av just detta fragment.

Penetrationen varierar också med standoff, se Figur 6. Då avståndet är litet är penetrationen lägre eftersom strålen inte har hunnit sträckas till sin fulla längd. Vid ett optimalt standoff når penetrationen sitt högsta värde - stridsdelar är ofta konstruerade för att initieras i närheten av detta avstånd. Vid större standoff avtar penetrationen på grund av att fragmenten avviker från symmetriaxeln eller roterar och då helt eller delvis missar hållkanalens botten.



Figur 6. Penetration som funktion av standoff. Från HIPEN.

Elementen i HIPEN är de fragment som strålen så småningom delas i. Före fragmenteringen förkortas elementens längd så att penetrationen vid korta standoff återges korrekt. Efter fragmenteringen modelleras standoff-beroendet genom att ta hänsyn till fragmentens avdrift i sida samt en enkel empirisk modell som ser till att penetrationen avtar linjärt med stand-off, se Figur 6.

För att korrekt återge penetrationen som funktion av standoff behöver HIPEN ett antal empiriska parametrar. Dessa parametrar kan anses höra ihop med antingen stridsdel eller målmaterial. Det är viktigt för penetrationsmodellens användbarhet att kunna separera de parametrar som har med strålbildningen att göra och de parametrar som har med målet att göra. Då kan parametrar för en viss stridsdel användas till flera målmaterial, och parametrar för ett visst målmaterial användas till flera stridsdelar. Med tillräckligt noggranna modeller och väl kalibrerade parametrar kan de analytiska metoderna användas till att uppskatta penetrationen av en viss stridsdel i en viss målstruktur, även om försöket inte har utförts.

## Slutsatser

Det finns idag ett enkelt verktyg för att simulera strålbildning från stridsdelar med koniska inlägg (RSVID). Det går att göra tillägg i koden som möjliggör andra geometrier hos inlägget. Det är också möjligt att använda finita element-program för att generera stråldata.

Det saknas verktyg för att hantera fragmenteringsmodeller. För strålar dokumenterade med röntgenbilder, där fragmenteringen ges av experimentet, finns verktyg för att beräkna penetration i mål bestående av ett eller flera enkelt modellerade material.

Maximal penetration kan bestämmas utan att ha tillgång till särskilt mycket experimentella data. Den fullständiga standoff-kurvan blir bättre och bättre beskriven då försök gjorts vid flera olika avstånd.

Om tillräckligt med röntgenbilder av fragmenterade strålar från samma typ av stridsdel finns, kan fragmenteringsmodeller implementeras i anslutning till den redan existerande strålbildningskoden. Utdata från denna kod kan sedan användas av penetrationskoden.

De verktyg som finns idag kan användas för att uppskatta penetrationen av verkliga såväl som fiktiva stridsdelar mot mål bestående av ett eller flera material. För att säkerställa att de teoretiska resultaten är tillförlitliga behöver även försök utföras.

Verktygen kan bli bättre om en databas med alla tillgängliga försök upprättas och dessa data används för att hitta de lämpligaste parametrarna för varje stridsdel och för varje målmaterial.

Även om det finns enklare modeller för modellering av penetration är HIPEN ett bra verktyg, särskilt för skiktade mål med material med skiftande hållfasthet, då sådana mål blir alltför komplicerade för enklare modeller.

## Framtida arbete

- Strålbildningskoden RSV1D bör modifieras så att den kan hantera inlägg med annan geometri än enkel konisk form.
- Fragmenteringsmodeller kan implementeras i anslutning till strålbildningskoden RSV1D. Parametrar till dessa modeller kalibreras mot utförda eller framtida försök.
- Utdata från strålbildningskoden RSV1D - med eller utan fragmenteringsmodell - bör formateras så att penetrationskoden HIPEN kan använda den som indata.
- Modellparametrarna i indatafilerna till penetrationskoden HIPEN bör organiseras så att strål- och målberoende parametrar separeras.
- En databas med tillgängliga försök bör upprättas och användas för att kalibrera parametrarna för intressanta stridsdelar och målmateriäl. Databasen kan användas för parametrar i såväl penetrationskoden som eventuella fragmenteringsmodeller.

## Referenser

- [1] C. Elfving, S. Karlsson och H. Hansson, "Modell för penetration av RSV i skyddstäckningar", Swedish Defence Research Agency, FOI, Tumba, Sweden, (Teknisk rapport/Technical report), FOI-R--1680--SE, 2005.
- [2] H. Hansson och L. Westerling, "RSV-penetration i skyddstäckningar", Swedish Defence Research Agency, FOI, Tumba, Sweden, (Teknisk rapport/Technical report), FOI-R--2344--SE, 2007.
- [3] J. Leikvik, "Analytisk modellering och numerisk implementering av riktad sprängverkan.", FOI, Stockholm, FOI-R--1356--SE 2004.
- [4] "LS-DYNA User's Manuals", Livermore Software Technology Corporation, V. 971, 2007.
- [5] L. Olovsson och A. Helte, "GRALE2D - an explicit finite element code for two-dimensional plane and axi-symmetric multi-material ALE simulations", FOI, Stockholm, FOI-S--1745--SE, 2005.
- [6] A. Helte, J. Lundgren, H. Örnhed och E. Lidén, "Karaktärisering av RSV-stridsdelen FFV 651", FOI-RH--0649--SE, 2007.
- [7] A. Helte, H. Örnhed, G. Andersson, J. Lundgren och T. Carlsson, "A numerical and experimental study of a hemispherical shaped charge" presenterad vid 21st International Symposium on Ballistics, Adelaide, 2004
- [8] C. Elfving och S. Karlsson, "Försök med RSV mot singel och betong", FOI, Tumba, Sweden, (Teknisk rapport / Technical report), FOI-R--0258--SE, 2001.
- [9] W. P. Walters och J. A. Zukas, *Fundamentals of shaped charges*. New York, USA: John Wiley & sons, 1989.
- [10] "HIPEN, Users Manual", Hydrosoft International, Livermore, California, USA, v 93.0, 1993.
- [11] *Fortifikationshandbok del 1, FortHI*: Försvarets bok- och blankettförråd, 1991.
- [12] R. J. Eichelberger, "Experimental Test of the Theory of Penetration by Metallic Jets", *J. Appl. Phys.*, vol. 27, s. 6, 1956.