

Gunnar Wijk

Splitterproduktionsmodell för verkansvärdering – en översiktlig beskrivning

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Vapen och Skydd
147 25 Tumba

FOI-R--1597--SE

Mars 2005

ISSN 1650-1942

Metodrapport

Gunnar Wijk

Splitterproduktionsmodell för verkansvärdering - en översiktlig beskrivning

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och Skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1597--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år Mars 2005	Projektnummer E2007
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Gunnar Wijk	Projektledare	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Splitterproduktionsmodell för verkansvärdering – en översiktlig beskrivning		
Sammanfattning (högst 200 ord) Projektilets och RSV-strålars in- och genomträngning av hårda metalliska mål beskrivs med en gemensam modell som satisfierar de grundläggande kraven, nämligen kontinuitetsekvationen, energikonservering och impulsbevaring. Målmaterialet deformeras elastiskt-plastiskt enligt etablerad kvasi-statisk teori tills projektilen/RSV-strålen befinner sig på ungefär en håldiameters avstånd från målets baksida. I detta läge krossas det återstående framförvarande målmaterialet till splitter som sprutar ut inom en konisk begränsningsyta runt projektilen/RSV-strålens bana. Modellen ger massan, hastigheten och rörelseriktningen för varje splitter. Dessa storheter behövs för att kunna bestämma eventuell utslagning av vitala komponenter som träffas av splittren. Modellen är avsedd att användas vid verkansvärdering av komplexa mål som stridsvagnar, flygplan och fartyg. Tills vidare behandlas endast fall då projektiler/RSV-strålar träffar och lämnar målet längs normalriktningarna hos dess ytor.		
Nyckelord projektil, RSV, splitter, verkansvärdering, modell		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 11 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---1597--SE	Report type Methodology report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year March 2005	Project no. E2007
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Gunnar Wijk	Project manager	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Overview of a model for fragment production in vulnerability and lethality assessment		
Abstract (not more than 200 words) <p>Projectile and Shaped Charge jet (SC) penetration and perforation of hard metallic targets is described with a common model that satisfies fundamental requirements, namely mass continuity, energy conservation and momentum conservation. Target material is deformed according to established quasi-static elastic-plastic theory until the Projectile/SC is about one hole diameter away from the rear target surface. At this point the remaining target material in front of the projectile is crushed to fragments that are ejected within a conical surface around the trajectory of the projectile/SC. The model yields the mass, velocity and direction of motion for every fragment. These quantities are needed to determine eventual kill of vital components that are hit by the fragments. The model is intended for assessment of effects and vulnerability of complex targets such as tanks, fighter aircraft and naval ships. Presently the model is restricted to cases when projectiles/SC:s hit and leave targets along the normal directions of the target surfaces.</p>		
Keywords projectile, shaped charge, fragments, assessment, vulnerability, lethality, model		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 11 p.	
	Price acc. to pricelist	

Inledning

Denna rapport beskriver en modell för splitterproduktion vid projektilers och RSV-strålars genomträngning av hårda metalliska mål. Den fullständiga matematiska redovisningen planeras ske under året i två publikationer i en serie av sex. De två första behandlar stela projektilers in- och genomträngning av hårda metalliska mål. Innehållet i den tredje har kortfattat redovisats som en metodrapport [1] under föregående kvartal, vari eroderande projektilers inträngning i metalliska mål behandlas samt ytterligare bakgrund till föreliggande rapport ges. En fullständigare redovisning planeras för publikation i en vetenskaplig tidskrift. Den fjärde publikationen behandlar produktion av splitter i samband med såväl stela som eroderande projektilers genomträngning av hårda metalliska mål. Den femte visar att RSV-strålar kan betraktas som eroderande projektiler och avses för extern publikation. Den sjätte publikationen behandlar produktion av splitter i samband med RSV-strålars genomträngning av hårda metalliska mål.

Matematiken som beskriver ovanstående situationer har i vissa avseenden jämförts med publicerade experimentella resultat varvid överensstämmelsen befunnits vara tillfredsställande. När det gäller splitter från RSV-strålar (i de sjätte publikationen) har resultat från egna experiment analyserats.

Avsikten med föreliggande metodrapport är att huvudsakligen verbalt beskriva hur produktion av splitter enligt modellen anses ske i samband med projektilers och RSV-strålars genomträngning av hårda metalliska mål. Tills vidare täcker modellen endast fall då projektiler/RSV-strålar träffar och lämnar målytor längs normalriktningarna.

Kort om splitterverkan

Vid verkansvärdering är det nödvändigt att ha en realistisk modell för produktion och verkan av splitter. Vid experiment med en given projektil eller RSV-stråle som tränger igenom en given målplåt kan plåtsplittren stoppas av träfiberplattor. Splitterhålen i plattorna ger omedelbart en god bild av splittrens rörelseriktningar. Det är däremot tidsödande att ta fram splittren samt att registrera splittermassorna och inträngningsdjupen, men fördelningen för splittermassorna blir noggrant bestämd. Inträngningsdjupen ökar med splitterhastigheterna men beräkning av splitterhastigheten med utgångspunkt från inträngningsdjupet innebär stor osäkerhet. Vanligtvis utgår man från experimentella resultat där s. k. FSP (FragmentSimulerande Projektiler) av olika storlekar skjutits mot träfiber materialet med olika hastigheter, men även sfäriska projektiler används.

Ett vanligt sätt att registrera splitter är via standardiserade vittnesplåtpaket. Ett sådant paket, enligt NATO standard STANG 4190 Metallic Pack 1, består av fem aluminiumplåtar med tjockleken $h=1.0$ mm som följs av fyra stålplåtar med tjockleken $h=1.5$ mm. Frigolitskivor med tjockleken 25 mm separerar de tre första aluminiumplåtarna samt alla plåtarna efter den femte plåten. Ju flera plåtar som genomträngs av ett splitter, desto större är energin och ”farligheten” hos detta splitter, men splittermassan m , splitterdiametern d och hastigheten v bestäms inte med denna metod. En enkel modell för den minsta hastighet v_{\min} som behövs för att ett sfäriskt splitter med tätheten ρ_P och diametern d skall tränga igenom en tunn plåt med tjockleken h och sträckgränsen Y_T ges av

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{12 \pi h Y_T}{\rho_P d^2} \left(\pi \frac{h}{d} + 1 \right)}. \quad (1)$$

Med utgångspunkt från en realistisk fysikalisk modell för projektilers och RSV-strålars penetration och perforation av splinterproducerande (dvs. hårda metalliska) mål föreslås förslag till en modell för splinterproduktion, som i vissa avseenden är så naturlig att den bör vara realistisk, men som i andra avseenden måste kompletteras med experimentellt underlag. Det naturliga i modellen ligger i uppskattningen av den totala massan av splinter och den principiella fördelningen av de individuella splintermassorna. Vidare är modellens sätt att bestämma splittrens rörelseriktningar naturlig, medan bestämning av hastigheterna är naturlig för projektiler men mera oklar för RSV-strålar. Varje splinter anses vara sfäriskt med av modellen bestämd massa, diameter, rörelseriktning och hastighet. Med dessa data kan inträngning i och genomträngning av vitala komponenter beräknas på ett realistiskt sätt med ekvationer liknande Ekv. (1), vilket är en förutsättning för en realistisk bedömning av utslagningssannolikheten för vitala komponenter i komplexa mål som träffas av projektiler och/eller splinter. Fortfarande återstår dock det svåra problemet att kvantifiera utslagningssannolikheter som funktioner av projektilers och/eller splitters massa, diameter, hastighet, inträngningsdjup, avlämnade impuls och energi och andra relevanta data.

Totalmassan av splinter

Om ett mål som träffas av en projektil eller en RSV-stråle är tillräckligt tjockt kommer projektilen/RSV-strålen att stoppas i målet utan att målets baksida deformeras. Om projektilens/RSV-strålens penetrationsförmåga är tillräckligt stor kommer emellertid framändan att nå till ett avstånd h^* från målets bakre yta som, enligt de tidigare nämnda modellerna för penetration och perforation, är något större än håldiametern D_T , närmare bestämt så att

$$h^* \approx 1.4 D_T. \quad (2)$$

Stela projektiler gör, enligt modellen, hål som har samma diameter d_p som projektilen men eroderande projektiler, som också omfattar RSV-strålar, gör hål med större diameter, varvid hålets diameter är proportionell mot projektilens alternativt RSV-strålspetsens momentana hastighet v samt omvänt proportionell mot en karaktäristisk hastighet v_T

$$D_T = d_p \frac{v}{v_T}. \quad (3)$$

Det antas att v_T i första hand beror på målmaterialet. Det kan emellertid också finnas ett visst beroende av projektilmaterialet så att v_T minskar med kvoten ρ_T/ρ_P mellan målets och projektilens tätheter.

När framändan är på avståndet h^* från målets bakre yta krossas det återstående materialet framför projektilen/RSV-strålen till splinter. Dessa splinter accelereras av den återstående rörelseenergin. Modelleringen av detta förlopp innebär att den totala massan av splinter är

$$m_T \approx \frac{\pi}{4} D_T^2 h^{(*)} \rho_T, \quad (4)$$

där $h^{(*)}$ är det mindre av h och h^* . Med denna modell är alltid kontinuitetsvillkoret (massans bevarande) för målmaterialet uppfyllt.

Splittrrens massfördelning

Den ackumulerade massan av de n största splittren ges av

$$M(n) = m_T \{1 - \exp(-B n^\lambda)\} \quad (5)$$

där B och λ måste bestämmas experimentellt. De två största splittren har således massorna

$$m_1 = m_T \{1 - \exp(-B)\} \approx B m_T \quad (6)$$

och

$$m_2 = m_T \{\exp(-B) - \exp(-B 2^\lambda)\} \approx B m_T (2^\lambda - 1) \quad (7)$$

där de approximativa högerleden gäller för (de för splitter normala fallen att) $B \ll 1$.

För splitter från projektiler finns experimentella resultat som motsvarar $B \approx 0.1$ och $\lambda \approx 0.5$. För splitter från RSV-strålar är motsvarande resultat $B \approx 0.05$ och $\lambda \approx 0.8$. Detta innebär att de senare är mindre och skiljer sig mindre från varandra än de förra, vilket är naturligt eftersom RSV-strålars splitter produceras av eroderande strålfragment som relativt sett är mycket mindre än håldiametern än vad som är fallet för de andra projektilerna.

En schematisk bild av splitterproduktionen med en stel projektil visas i Figur 1. De största splittren kommer från ytan. I området med mörkare skuggning (innanför de streckade kurvorna) är målmaterialet plastiskt deformerat. Utanför detta område är deformationen rent elastisk.

Splitterhastigheter från projektilperforation

Enligt modellen för splitterproduktion som åskådliggörs i Figur 1 antas att splittren kastas ut inom en konisk begränsningsyta. Konens toppvinkel 2Ψ är i allmänhet mindre än motsvarande vinkel 2Θ för den yttre splitterbegränsningsytan i Figur 1 och minskar med ökande trubbighet hos projektilnosen. Splitterrörelsen åskådliggörs i Figur 2 vid två närliggande tidpunkter efter att projektilen lämnat målet.

Figur 2 (liksom i princip också Figur 1) härrör från en modell för produktion av splitter med eroderande projektiler [2]. Denna är emellertid alltför komplicerad för att kunna nyttjas i de applikationer som föreliggande rapport avser. Därför har de numeriskt beräknade resultaten i [2], via mätning av avstånd i Figur 2, omvandlats till de matematiska uttrycken i Ekv. (8) och (9), vilka med tillräcklig noggrannhet beskriver situationen i Figur 2.

Hastigheterna u_1 för de främsta (och största) splittren avtar med ökande vinkel ϑ från projektilens rörelseriktning, där således $0 < \vartheta \leq \Psi$. Detta avtagande beskrivs med

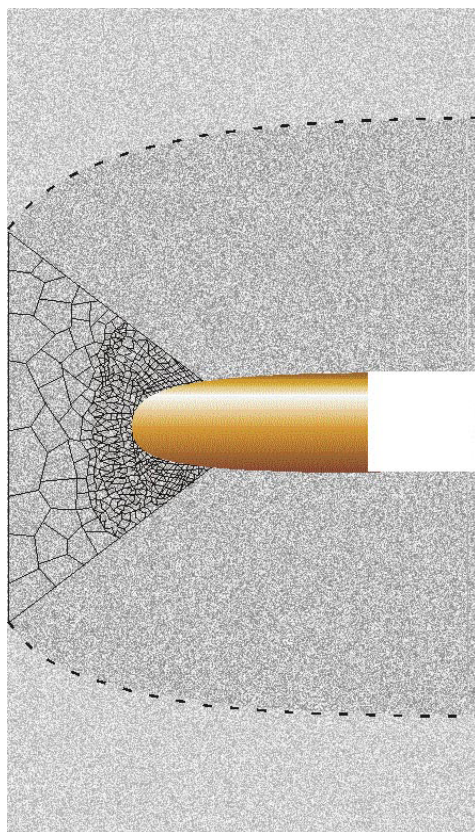
$$u_1 = v_{exit} \cos\left(\frac{\pi \vartheta}{3\Psi}\right), \quad (8)$$

där v_{exit} är projektilens utgångshastighet. Denna utgångshastighet bestäms av att den sammanlagda rörelseenergin för projektilen och splittren högst kan vara lika med projektilens anslagsenergi minus penetrations- och perforationsarbetet. Därmed säkerställs att energikonserveringsvillkoret uppfylls.

För fallet i Figur 2 gäller $\Psi \approx \pi/3$. Det innersta splittret rör sig med en hastighet som är ungefär $\cos^{-1}(\pi/3)=2$ gånger större än för det yttersta. Hastigheterna u_2, u_3, \dots för splittren från följande lager ges av

$$\frac{u_{j+1}}{u_j} = 1 - \frac{0.2}{j} \quad (9)$$

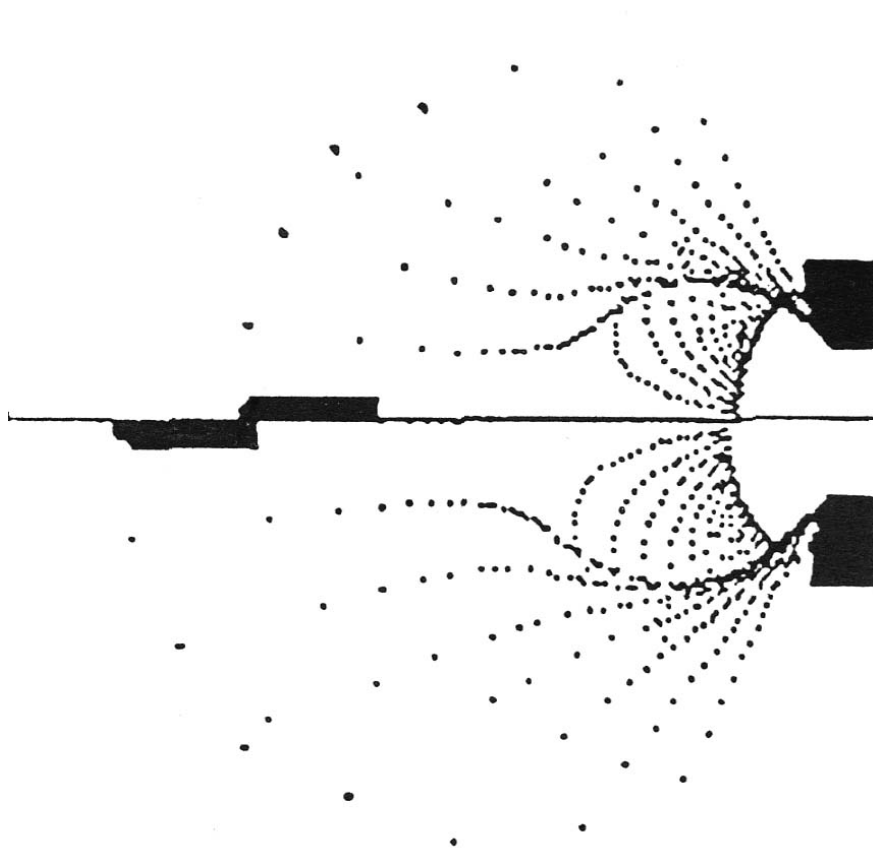
för $j=2, 3, \dots$



Figur 1. Schematisk bild av splitterproduktion i samband med att en stel projektil tränger igenom en plåt av hårt metalliskt material. Splittren kommer från en volym med konisk begränsningsyta, vars toppvinkel är 2Θ .

Splittermassorna m_n för $n=1, 2, 3, \dots$ används för att beräkna motsvarande volymer. När splittret har lämnat målet och eventuellt träffar något annat föremål så betraktas det som sfäriskt, men när splittret skapas antas det vara approximativt kubiskt varvid kantlängden erhålls. Därmed kan antalet splitter N_S från ytan beräknas. Splittren rör sig längs rätlinjiga banor som startar i respektive splitters tyngdpunkt och som i motsatt riktning strålar samman i toppunkten för den koniska begränsningsytan med toppvinkeln 2Ψ . Denna punkt antas vara på djupet $D_T\{1+\cot(\Theta)\}/2$ innanför målets

bakre yta. Via Monte Carlo-metoden (dvs. lottning med slumpstal) bestäms hur de N_S riktningarna paras ihop med de N_S splittren. Vid tillämpning av modellen kommer således det största splittret, och naturligtvis också alla andra splitter, i allmänhet att gå i olika riktningar från en Monte Carlo-cykel till nästa, varmed spridning introduceras på ett realistiskt sätt i såväl detta som andra avseenden. Ytterligare spridning introduceras genom att parametrarna B och λ varieras från en Monte Carlo-cykel till nästa genom att dessa storheter också bestäms genom att lottas, exempelvis från normalfördelningar för dessa storheter med lämpliga medelvärden och standardavvikelser.



Figur 2. Överst visas projektilens och splittrens (punkterna visar splittrens centra men ej deras storlekar) positioner vid en viss tidpunkt efter det att projektilnosen passerade målets bakre yta. Underst visas motsvarande positioner efter en något senare tidpunkt då projektilen förflyttats ungefär lika långt som sin egen längd [2].

Summan av medelkantlängderna för splitter från föregående splitterlager bestämmer djupet till nästa splitterlager. Med detta och splitterbegränsningsytans halva toppvinkel Θ i Figur 1 kan antalet splitter från detta andra lager beräknas analogt med N_S . På samma sätt erhålls motsvarande värden för alla splitterlager. Dessa beräkningar avbryts när splittren och/eller deras hastigheter är så små att de kan anses vara ofarliga. Eftersom de första splittren, som går fortast, också är de största så är det dessa som är farligast och som det är mest angeläget att beskriva realistiskt och noggrant. Svärmen av "splitterdamm" med låga hastigheter kommer i praktiken aldrig, eller åtminstone bara sällan, att behöva beaktas.

De numeriska beräkningarna som ger resultatet i Figur 2 är utförda i axialsymmetrisk geometri, dvs. inte som i den tredimensionella verkligheten. Därmed skall egentligen splittren från respektive lager inte ses som lokala massor med ungefär samma utsträckning i alla de tre dimensionerna, utan som expanderande ringar där expansionen sker utan att töjningsenergi förekommer. Med den antagna massfördelningen enligt Ekv. (5), en given vinkel toppvinkel Θ för splittermassan i Figur 1 samt antagandet att splittren är kubiska bestäms antalet splitter i varje ring och i varje lager. Ringarnas expansion motsvarar att splitter i en ring fjärrar sig från varandra. Emellertid är den enkla massfördelningen enligt Ekv. (5) inte identisk med massfördelningen i [2], vilket innebär att såväl antalet ringar i varje lager som tjockleken av lagren i allmänhet inte stämmer med bilden i Figur 2. Med experimentella resultat i form av röntgenblyxtfotografier splittersvärmar är det, åtminstone i princip, möjligt att bestämma andra värden på de numeriska storheterna $\pi/3$ i Ekv. (8) respektive 0.2 i Ekv. (9), så att dessa samband ger en bättre beskrivning av verkligheten.

Numeriska simuleringar av splitter redovisas också i [3] och är uppenbarligen också utförda i axialsymmetrisk geometri. Resultaten i [3] skiljer sig från bilden i Figur 2 i det att splittersvärmen närmast kan liknas vid en ihålig sfärisk sektor. Splittertätheten är någorlunda konstant inom ett koniskt skal, med en toppvinkel $2\Psi \approx 60^\circ$, samt den anslutande sfäriska frontytan med restprojektilen i centrum. Splittren innanför den sfäriska frontytan har således nästan samma hastighet som restprojektilen, vilket inte överensstämmer med Figur 2 och motsvarande ansats i Ekv. (8). De splittersvärmar som registrerats med röntgenblyxtfotografering i [3] förefaller överensstämma bättre med beräkningarna i [2], och därmed också med Ekv. (8), när det gäller hastigheterna för de främsta splittren som funktion av vinkeln ϑ .

Splitterhastigheter från RSV-stråleperforation

Splitter som produceras av stela eller eroderande projektiler bör kunna antas följa den ovan beskrivna modellen. Röntgenblyxtfotografiet i [2] av splittersvärmen (som inte störs av extra skyddsmaterial på målplåtens baksida) ger åtminstone visuellt stöd för detta antagande. Däremot är det mera diskutabelt hur hastigheterna för splittren från RSV-strålar skall modelleras. Det är uppenbarligen bara en begränsad del av strålen som producerar splitter och accelererar dessa. Eftersom splittermassan normalt sett är betydligt större än denna begränsade stråldelsmassa, dvs $D_T \gg d_p$, måste åtminstone medelhastigheten hos splittren (på grund av kravet på energins bevarande) vara betydligt lägre än hastigheterna hos en väsentlig del av den efterföljande RSV-strålen. Således kommer den efterföljande stråldelen passera splittersvärmen, varvid endast de (relativt sett) få splitter som är närmast strålen kan accelereras ytterligare i samband med att de träffas av de främsta strålfragmenten.

Den principiella skillnaden mellan en RSV-stråle och en eroderande (eller stel) projektil är att strålen, enligt modellen, består av smält material utan hållfasthet i vilket inga elastiska vågor kan transmittas. De delar av strålen som inte befinner sig omedelbart intill hålbotten retarderas således inte alls vilket betyder att den senare del av strålen kommer att gå igenom hålet utan att påverkas av målet när alla splittren förflyttat sig ur strålbanan. Den eroderande projektilen består av material med en temperatur långt under smältpunkten men där framändan, återigen enligt modellen, momentant smälter samtidigt som elastiska vågor fortplantas bakåt i den återstående projektilen, varigenom dess hastighet kontinuerligt reduceras. När splittren framför projektilen förflyttats ut ur dess bana har de främsta splittren samma eller obetydligt lägre hastighet än projektilen, dvs. såsom är fallet i Figur 2.

De ovan beskrivna omständigheterna innebär att en modell för bestämningen av den maximala hastigheten u_{\max} för målsplitter från en RSV stråle inte relateras teoretiskt till hastigheten v_{perf} för fronten på den efterföljande stråldelen på liknande sätt som för projektiler i Ekv. (8) och Figur 2. Därför föreslås tills vidare ett empiriskt samband som baseras på röntgenblixtfotografier av splittersvärmens utbredning som följd av en RSV-stråles perforation, nämligen

$$u_{\max} \approx 0.4 v_{perf} . \quad (10)$$

Det experimentella underlaget till Ekv. (10) behöver dock kompletteras.

Referenser

1. G. Wijk, Modell för eroderande projektilinträngning vid verkansvärdering. FOI-R--1446--SE, December 2004.
2. A. L. Yarin, L. V. Roisman, K. Weber & V. Hohler. Model for ballistic fragmentation and behind-armor debris. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, pp. 171-201, 2000.
3. W. Riedel, K. Weber, M. Wicklein, K. Thoma and J. Färber, Reduction of fragment effects behind layered armour. Experimental and numerical analysis. 21th International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia, April 19-23, 2004.