

4. Vybrané typy balistických útočných prostředků a metody hodnocení jejich účinků

Jak již bylo uvedeno v úvodní kapitole, existuje značné množství prostředků rázového zatěžování, ať již to jsou klasické projektily, ráz nepravidelných těles, působení výbušnin, účinky pulzního laseru a řada dalších. V rámci dané kapitoly se omezíme zejména na ty z nich, které nejčastěji ohrožují vozidla, a tím pochopitelně i lidskou osádku. V tomto směru rozeznáváme střely a střepiny, jejichž účinek je charakterizován zejména jejich kinetickou energií, dále granáty a miny a v neposlední řadě tzv. improvizovaná výbušná zařízení, která jsou velmi častým útočným prostředkem teroristů.

4.1. Střely a střepiny

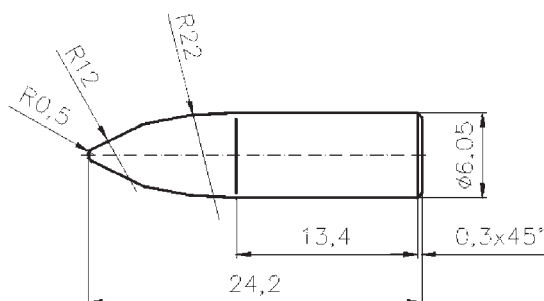
Pro překonání lehké pancéřové ochrany (Rolc and Buchar, 2003) se používá zejména malorážová AP (Armour piercing – průbojná střela) munice s plášťovými střelami s ocelovým jádrem zušlechťeným na tvrdosti 63–65 HRC. Tato jádra jsou křehká, a tudíž náchylná k fragmentaci. Představiteli této munice jsou např. 7,62 × 39 API BZ, 7,62 × 51 AP nebo 7,62 × 54R API. Jejich průbojný účinek je dán zejména tvrdostí jádra (Anderson et al., 1999; di Benedetto, 2018).

Pro dosažení vyšších průbojných účinků jsou vyvíjeny malorážové projektily s jádrem zhotoveným z materiálů o vysoké hustotě a tvrdosti, stejně jako u šípových projektilů. Příkladem materiálu jádra je karbid wolframu. Pláště těchto projektilů jsou zpravidla z měkké oceli plátované tombakem, ocelo-tombakové, případně s olovenou košilkou. Přehled některých typických projektilů uvádí tabulka 4.1.

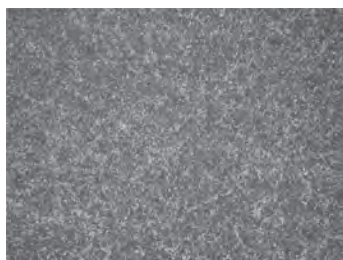
Tab. 4.1. Některé typy průbojných malorážových projektilů

Typ munice	Výrobce	Střela					Jádro			
		Průměr (mm)	Délka (mm)	Hmotnost (g)	Průměr (mm)	Délka (mm)	Hmotnost (g)	Materiál	Tvrдость (HV)	Hustota (kg/m ³)
7,62 × 39 PZ	S&B	7,62	27,4	7,7	6,0	22,7	4,0	Ocel	630–910	7,85
7,62 × 39 AP8	NAMMO	7,62	23,3	8,1	5,0	18,3	5,2	WC	1 340	14,30
7,62 × 54 PZ	S&B	7,62	37,7	10,4	6,0	28,4	5,4	Ocel	848–870	7,85
7,62 × 51 AP	Hirtenberger	7,62	32,6	9,45	5,6	26,2	4,3	Ocel	745–805	7,85
7,62 × 51 AP	FN	7,62		9,75	6,0	23,3	3,8	Ocel	830	7,85

Příklad konstrukčního provedení jádra průbojné střely 7,62 × 51 AP je uveden na obr. 4.1. Jádro je vyrobeno z běžné vysokouhlíkové nízkolegované oceli zakalené na tvrdost 810 HV 10 s mikrostrukturou velmi jemného martenzitu a rovnoměrně rozložených jemných karbidů – viz obr. 4.2.

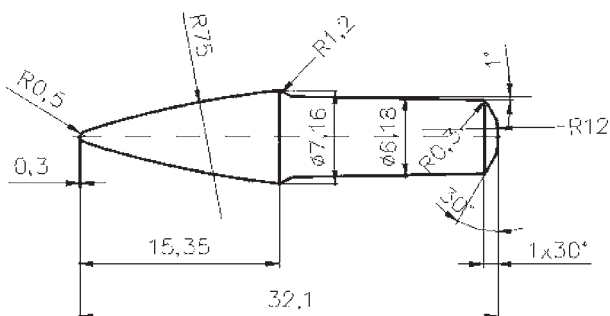


Obr. 4.1. Jádro střely 7,62 × 51 AP (S&B).



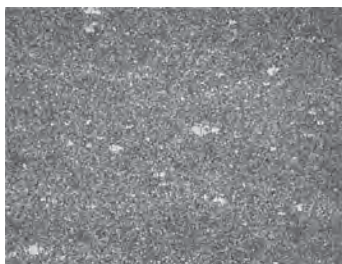
Obr. 4.2. Mikrostruktura jádra projektilu 7,62 × 51 AP (S&B).

Jiný příklad provedení jádra průbojné střely s částečným opláštěním je ukázán na obr. 4.3. Jádro je zhotoveno z nástrojové oceli na bázi 5,3 % W, 3,7 % Cr, 3,7 % Mo a 1,8 % V s tvrdostí 750 HV10 a strukturou jemného martenzitu s eutektickými a sekundárními karbidy – obr. 4.4.

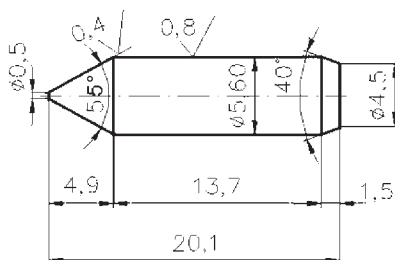


Obr. 4.3. Jádro střely 7,62 × 51 AP (Francie).

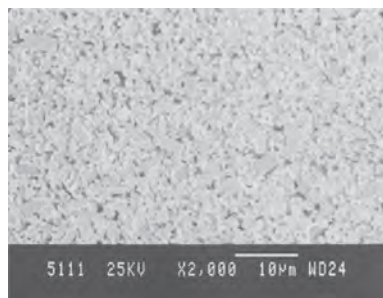
Příklad dosud nejúčinnějšího projektilu 7,62 × 54R AP8 s jádrem ze slinutého karbidu wolframu je uveden na obr. 4.5. Částice WC jsou uloženy v kobaltové matici – viz obr. 4.4.



Obr. 4.4. Mikrostruktura jádra projektilu 7,62 × 51 AP (Francie).



Obr. 4.5. Jádro střely 7,62 × 54R AP8 (NAMMO – Švédsko).



Obr. 4.6. Mikrostruktura jádra projektilu 7,62 × 54R AP8 (NAMMO – Švédsko).

Průbojné účinky uvedené munice byly zkoumány jednak na terčích z pancéřové oceli typu 2P, ArmoX 500 S a ArmoX 600S, jednak na skládaných pancířích typu keramika – kovová podložka. Z výsledků zkoušek vyplynuly některé základní poznatky:

- Střela s jádrem z karbidu WC má cca 1,5× vyšší průbojný účinek než střela s ocelovým jádrem.
- Různé typy střel s ocelovým jádrem vykazují rozdílný účinek na terčích z pancéřových ocelí. U střel s jádrem z WC pak vykazují rovněž rozdílné účinky, ale rozdíly jsou podstatně nižší než v předcházejícím případě.
- Pokud tvrdost jádra převyšuje tvrdost pancíře, rozhoduje o průbojné schopnosti kinetická energie jádra.
- Pokud tvrdost jádra nedosahuje tvrdosti pancíře, rozhoduje o průbojné schopnosti kinetická energie celé střely.
- Průrazný účinek střel s jádry o vyšší tvrdosti, než má pancíř, je násobkem průrazné schopnosti střel s jádry o nižší tvrdosti, než má pancíř.
- Malé změny v tvrdosti pancíře mají vliv na průbojnost střely pouze v těch případech, kdy tvrdosti pancíře a jádra jsou srovnatelné.

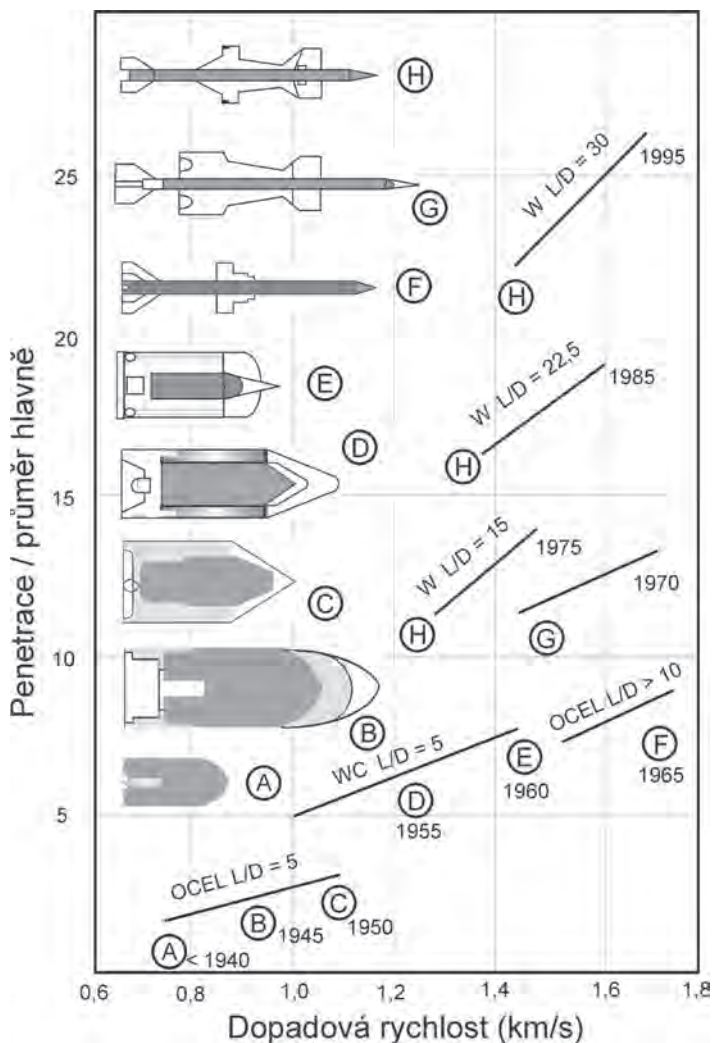
Pro zvýšení účinků projektilů na pancíře byly vyvíjeny projektily označované: APDS (Armour-Piercing Discarding Sabot) – Průbojná střela s oddělitelným vodicím pouzdrem,

APDS-T (Armour-Piercing Discarding Sabot Tracer) – Průbojná střela s oddělitelným vodicím pouzdrem a se stopovkou,

APFSDS (Armour-Piercing Fin Stabilised Discarding Sabot) – Průbojná střela s oddělitelným vodicím pouzdrem stabilizovaná křídélky,

APFSDS-T (Armour-Piercing Fin Stabilised Discarding Sabot Tracer) – Průbojná střela s oddělitelným vodicím pouzdrem stabilizovaná křídélky se stopovkou.

Tyto projektily byly vyvíjeny s cílem dosáhnout koncentrace co největší kinetické energie na co nejmenší ploše. Dosažení vysoké hodnoty kinetické energie je možné jednak růstem rychlosti a dále růstem hmotnosti projektilu. Prvz z těchto faktorů vedl k vývoji projektilů, které obsahovaly jádro z materiálu o vysoké hustotě. Jako materiál jádra se používal a používá wolfram, jeho slitiny, karbid wolframu a ochuzený uran (Candai et al., 1995; Cantaluppi and Degetto, 2000; Cury, 2013). Vývoj příslušných projektilů je schematicky znázorněn na obr. 4.7.



Obr. 4.7. Vývoj kinetických projektilů.

Jak podrobněji uvádí Lampert et al. (2001), průlom v dané technologii přinesl vývoj v bývalém SSSR, a to v souvislosti s vývojem tanku T 62. U tohoto tanku (kanón ráže 115 mm) byla zavedena munice používající projektily APFSDS délky větší než 400 mm a průměru cca 40 mm (3F na obr. 4.7.). Tyto projektily byly vedeny v hlavní pomoci tří vzájemně oddělených nosičů. Toto řešení je považováno za jistý přelom ve vývoji daných projektilů. Od té doby se účinnost těchto projektilů výrazně zvyšuje, což souvisí jak s vývojem jejich geometrie, tak rovněž s vývojem vlastností materiálu jádra, kde v důsledku přidávání různých legur (Ni, Co, Fe, Cu a Mn) a tepelného zpracování se daří výrazně zlepšovat mechanické vlastnosti. V tabulce 4.2a. je uveden vývoj vlastností slitin wolframu.

Tab. 4.2a. Vývoj mechanických vlastností slitin wolframu

Generace	1		2	3
Rok dosažení	1970	1978	1985	1995
Mez pevnosti v tahu (MPa)	800	1200	1450	1700
Mez kluzu (MPa)	650	1000	1400	1650
Tažnost (%)	1–4	» 6	» 8	» 8

Celkově je možné konstatovat, že zmíněné projektily umožňují dosáhnout v pancéřové oceli penetrace až šestinásobku kalibru použité zbraně. Ve zjednodušeném pojetí pak představují štíhlé tyče, kde například pro kalibr 120 mm má používaný projektil průměr 23 mm a délku 700 mm. Ukončení je zpravidla ve formě kužele o vrcholovém úhlu cca 30°. Pro úplnější představu jsou uvedeny základní parametry některých používaných střel:

Podkaliberní střela BM 15 (hmotnost 3,9 kg, délka 479 mm, $L/D = 12$, penetrace až 380 mm v RHA oceli)

Podkaliberní střela PpSv-97 (hmotnost 4,5 kg, délka 496 mm, $L/D = 20$, penetrace až 500 mm v RHA oceli)

Podkaliberní střela BM42 (hmotnost 4,85 kg, délka 536 mm, $L/D = 16$, penetrace až 460 mm v RHA oceli)

Pro další zvyšování účinnosti projektilů je mj. potřebné zvyšovat velikost jejich délky a snižovat velikost průměru tak, aby nedocházelo ke zvyšování hmotnosti projektilu a tím k redukci jeho úst'ové rychlosti. Pokud však poměr délka – průměr přesáhne hodnotu cca 30, vykazuje projektil tendenci k ohybu a tím k narušení vnitřní a vnější balistiky. Pro eliminaci tohoto jevu jsou jádra těchto projektilů potahována různými povlaky. Pro dosažení optimálního

výsledku jsou vhodné povlaky zhotovené z materiálů o nízké hustotě a o vysoké hodnotě Youngova modulu. Dosavadní, víceméně skromné výsledky ukazují, že poměrně nadějně materiály povlaku představují vláknité kompozity. Při vývoji těchto projektilů se ve stále větší míře uplatňují numerické simulace – viz např. Magier (2011).

O účinnosti jednotlivých projektilů existuje řada údajů, které jsou uvedeny v tab. 4.2b., kde jsou uvedeny maximální tloušťky desky z homogenní pancéřové oceli (RHA), kdy dojde k průstřelu. Současně je uvedena vzdálenost, ze které je vystřeleno (Ogorkiewicz, 2002).

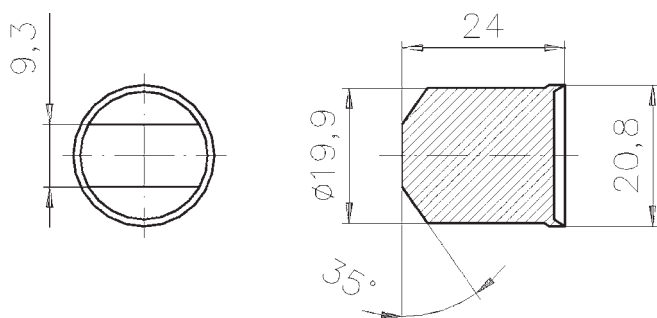
Tab. 4.2b. Účinnost projektilů při kolmém dopadu na desku z RHA oceli

ROZMĚR PROJEKTILU	TYP PROJEKTILU	VZDÁLENOST (m)	TLOUŠŤKA (mm)
7,62 × 51 mm	BALL	0	8
7,62 × 51 mm	AP	0	15
7,62 × 51 mm	AP(WC)	0	25
12,7 × 99 mm	AP	200	24
12,7 × 99 mm	AP (WC)	200	41
14,5 × 114 mm	AP	500	28
14,5 × 114 mm	AP (WC)	500	35
20 × 139 mm	AP	500	30
20 × 139 mm	AP (WC)	500	38
25 × 137 mm	APDS	1 000	50
25 × 137 mm	APFSDS	1 000	80
30 × 165 mm	AP	1 000	36
30 × 165 mm	APDS	1 000	54
30 × 173 mm	APDS	1 000	61
30 × 173 mm	APFSDS	1 000	110
35 × 228 mm	APDS	1 000	90
35 × 228 mm	APFSDS	1 000	120
40 × 365 mm	APFSDS	1 500	135
50 × 330 mm	APFSDS	1 500	135
60 × 411 mm	APFSDS	2 000	240

Pro výzkum účinků střepin byly vyvinuty simulátory střepin FSP (fragment simulating projectile). Generátor střepin je definován normou NATO-STANAG 2920.

Tvar střepiny je uveden na obr. 4.8. Tvar střepiny vychází z požadavků normy na konstantní poměr hmotnosti W (g) a stykové plochy S s průměrem D (mm) dle vztahů:

$$W = 0,007 \times D^3 \text{ a } S = 0,785 \times D^2$$



Obr. 4.8. Simulátor střepin.

Střepinový simulátor FSP použitý pro simulaci dělostřeleckého prostředku ohrožení by měl odpovídat údajům v tab. 4.3.

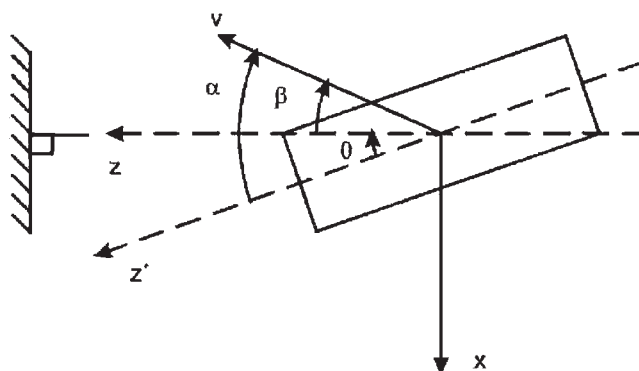
Tab. 4.3. Rozměry a hmotnost střepinového simulátoru

Střepinový simulátor	Hmotnost (g)	A (mm)	Ø B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Ø F (mm)	G (mm)	Ø H (mm)
20 mm	53,8 ± 0,26	9,27 -0,4	19,89 ±0,05	24,00	1,62 ±0,05	1,62 ±0,05	20,83 +0,08	20,83 +0,08	18,80 ±0,12

Při sledování interakce projektilu s překážkou je jedním z rozhodujících faktorů i vzájemná poloha projektilu a terče. Vezmeme-li do úvahy válcovou symetrii projektilu, pak můžeme tuto polohu znázornit způsobem uvedeným na obr. 4.9.

Pomocí tohoto obrázku můžeme definovat následující pojmy:

- **Šikmost** (obliquity), která je dána úhlem β , tzn. úhlem mezi kolmicí k rovině terče a vektorem rychlosti \mathbf{v} těžiště projektilu.
- **Úhel dráhy projektilu** (trajectory angle) θ , což je úhel mezi tečnou k trajektorii těžiště projektilu a normálou k rovině terče.
- **Úhel vybočení** (yaw angle) α , což je úhel mezi tečnou trajektorie projektilu v jeho těžišti a vektorem rychlosti těžiště projektilu. Je zřejmé, že platí $\alpha = \beta + \theta$.



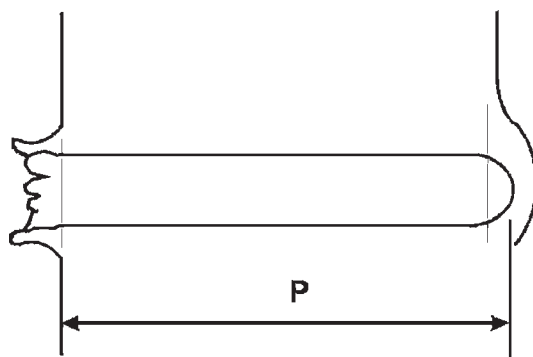
Obr. 4.9. Schéma základních úhlů popisujících geometrii interakce projektilu s rovinným terčem.

Pomocí těchto pojmů rozeznáváme:

- **Normální dopad projektilu** (normal incidence), kdy je vektor rychlosti projektilu totožný s tečnou trajektorie projektilu (u osově souměrných projektilů s osou symetrie projektilu).
- **Šikmý dopad projektilu** (oblique incidence), který dělíme na šikmý dopad bez a s vybočením. Pro nulové vybočení pak platí: $\theta = |\beta|$.

Při interakci projektilu s terčem pak v první řadě rozlišujeme dva případy:

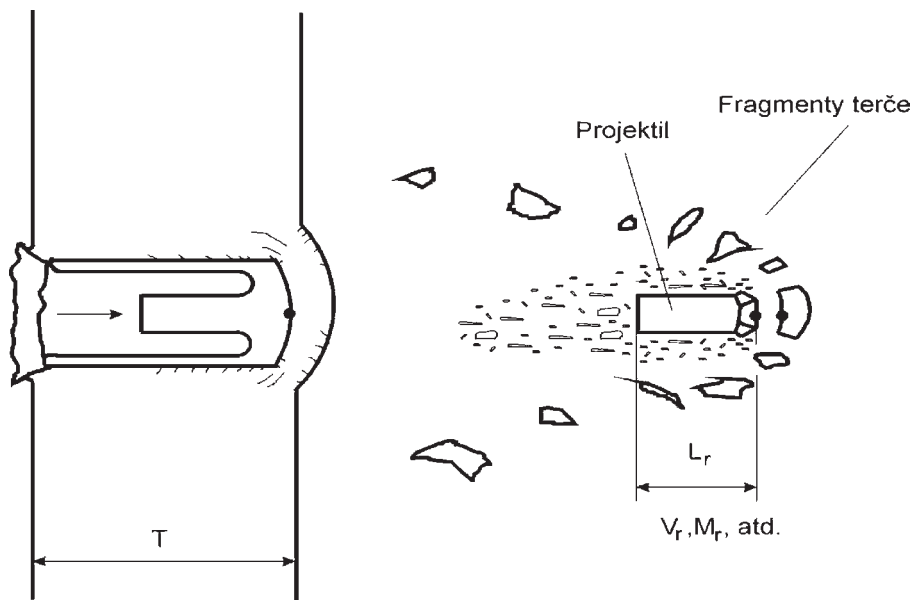
1. Projektil zůstane uvnitř terče. Pro tento případ používáme pojem **penetrace** a zavádíme hloubku penetrace – viz obr. 4.10.



Obr. 4.10. Schéma stanovení hloubky penetrace při kolmém dopadu projektilu.

2. Projektil prorazí terčem. V tomto případě mluvíme o **průrazu**, resp. o **perforaci**. Průběh perforace je pro kolmý dopad znázorněn na obr. 4.11. Předpokládáme

osově symetrický projektil o délce L_0 , který dopadá rychlostí V_0 na rovinný terč o tloušťce T . Při pohybu projektilu v terči dochází k erozi projektilu, kdy erodované částice se pohybují zpět. Současně dochází k vyboulení týlní strany terče – viz levá část obr. 4.11.



Obr. 4.11. Schéma perforace rovinného terče při kolmém dopadu projektilu. L_r označuje délku projektilu po perforaci terče a M_r jeho hmotnost.

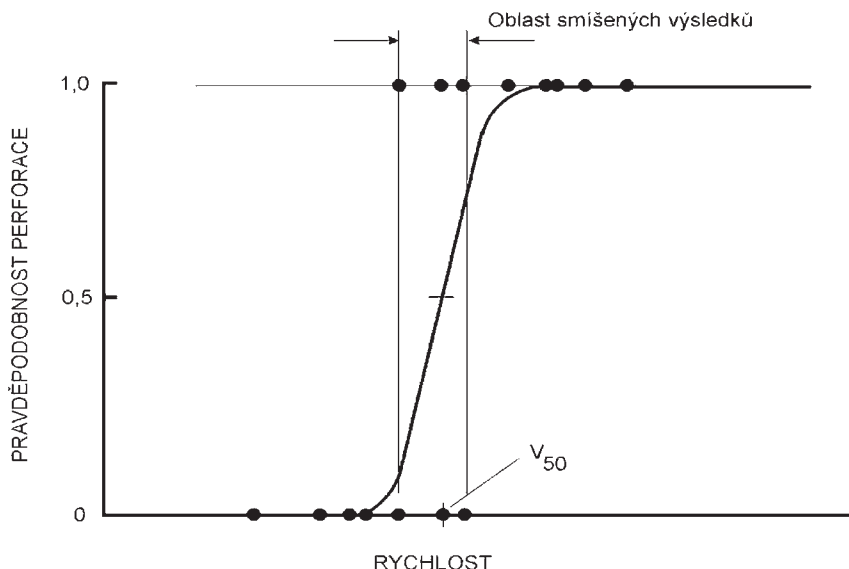
Následuje průraz terče, kdy vedle projektilu, jehož původní délka, hmotnost a rychlost poklesly na nižší hodnoty, se vyskytnou za terčem i úlomky (střepiny, fragmenty). Ty vznikají jednak porušením vyboulené části terče, fragmentací čela projektilu a dále jsou zde fragmenty, které vznikly uvnitř terče.

Je pochopitelné, že při hodnocení účinků projektilů je třeba zavést vhodný kvantitativní údaj. Tímto údajem je tzv. **balistická mez označovaná jako V_L , resp. V_{lim}** . Jde o takovou hodnotu dopadové rychlosti, při které ještě nedojde k proražení terče a pro rychlost větší již k proražení dojde. Stanovení této veličiny je, s ohledem na rozptyl vlastností jak terče, tak projektilu, spolu s praktickou nemožností exaktní reprodukce dopadové rychlosti prakticky nemožné, a proto se používá jiných postupů.

Balistická mez V_{50}

Tato veličina je založena na vyhodnocení experimentů, kdy terč nastřelujeme projektily o různé dopadové rychlosti a vyhodnocujeme, zda dojde, či nedojde

k průrazu terče. Pro první případ, kdy k perforaci nedojde, přiřadíme pravděpodobnost 0 % a pro druhý případ, kdy dojde k perforaci, přiřadíme pravděpodobnost 100 %. Jestliže vyneseme závislost pravděpodobnosti na dopadové rychlosti, dostaneme funkci, která je schematicky znázorněna na obr. 4.12.



Obr. 4.12. Schéma stanovení balistické meze V_{50} .

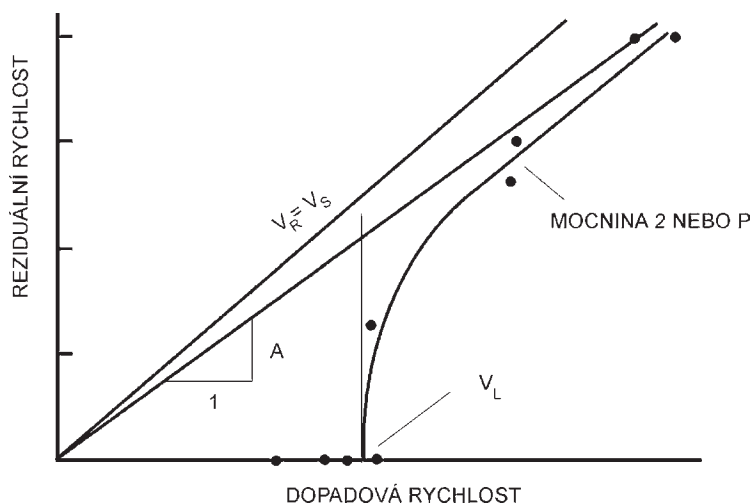
Je patrné, že existují dvě oblasti oddělené přechodovou oblastí, která zahrnuje případy, kdy dojde i nedojde k průrazu. Jako balistická mez V_{50} se bere dopadová rychlost, která leží v polovině této přechodové oblasti.

Je zřejmé, že tento postup umožňuje stanovit další balistické meze, například V_{10} , což je balistická mez, kdy k průrazu dojde s pravděpodobností 10 %. Problematikou spolehlivosti daného postupu se zabývá například Riegel III. (2013).

Balistická mez θ_{50}

Při šikmém dopadu často volíme dopadovou rychlost projektilu o konstantní velikosti. Je zřejmé, že s růstem úhlu θ se zvyšuje střelecká odolnost terče. Stejným postupem jako v předcházejícím případě můžeme stanovit balistickou mez θ_{50} . Při tomto označení apriori předpokládáme, že úhel vybočení (yaw angle) je roven nule. V případě šikmého dopadu však před přechodovou oblastí existuje oblast, kde dochází k úplnému odrazu projektilu. Rozsahy jednotlivých oblastí pochopitelně závisí na velikosti dopadové rychlosti.

Vedle tohoto postupu je v posledním období používán další přístup, který je založen na hodnocení dopadové rychlosti V_0 a na stanovení reziduální rychlosti projektilu V_R . Vyneseme-li závislost reziduální rychlosti na rychlosti dopadové, pak můžeme těmito body proložit určitou funkcí. Bod, kde graf této funkce protíná osu dopadových rychlostí, určuje balistickou mez V_L . Schéma tohoto postupu je uvedeno na obr. 4.13.



Obr. 4.13. Schéma stanovení balistické meze V_L .

Jednou z možných závislostí je rovnice, kterou navrhli Lambert a Jonas (1976). Pro experimentální výzkum je používáno uspořádání, které je schematicky znázorněno na obr. 4.14.

V rámci daného uspořádání je stanovována dopadová rychlost projektilu a rovněž jeho reziduální rychlost. Mimo to jsou v určité vzdálenosti umístěny tzv. svědečné desky, které ukazují na průbojnou schopnost projektilu po průrazu desky ze zkoumaného materiálu. Snímek reálného zařízení je na obr. 4.15a.

Pohled na rám se snímači rychlosti projektilu je na obr. 4.15b.

Na následujícím snímku je pohled na přípravek pro uchycení desky. Deska je na horní a dolní straně chycena v pohyblivém rámu a upevněna šrouby.

Na následujícím obrázku je pak pohled na tzv. svědečné desky, což jsou zpravidla desky z oceli 11 375, tloušťky 2,5 mm umístěné ve vzdálenosti 10 cm. Plechy mají tvar čtverce o straně 500 mm. Účelem těchto desek je dokumentovat účinky projektilu po průchodu deskou.