



POROVNÁNÍ CHOVÁNÍ NÁHRADNÍCH MATERIÁLŮ V BALISTICKÉM EXPERIMENTU

COMPARISON OF BEHAVIOUR OF ALTERNATIVE MATERIALS IN A BALLISTIC EXPERIMENT

Ludvík JUŘÍČEK¹

SUMMARY:

The comparison of behaviour of selected alternative materials of biological tissue by firing at them with small-calibre ammunition shows peculiarities of making temporary or permanent cavities in individual AM blocks with plastic characteristics, and prediction of fire channel development in case that real tissue is hit. The paper characterises the impact of AM physical and mechanical properties on a projectile trajectory passing through a testing block, and its changes in form and weight. The paper presents the first application of contrast agents for coloration of the fire channel caused by a projectile in a gelatine block. This should make easier the evaluation of size and form of the temporary cavity created in a transparent environment.

KEYWORDS: temporary cavity, permanent cavity, changes in form, changes in weight, contrast agent.

ÚVOD

Předmětem *ranivé balistiky* je zkoumání vzájemné interakce malorážové střely (protipěchotních nábojů do ráže 12,7 mm) a biologického cíle.

Zatímco *střela* je svým tvarem, geometrickými rozměry a hmotností jednoznačně definována, *lidské tělo* je ve svém celku nehomogenním objektem tvořeným prostředími (kůže, svalová tkáň, vnitřní orgány a kosti) o různých fyzikálních, mechanických a biologických vlastnostech (hustota, viskozita, stlačitelnost, tvrdost, pevnost, elasticita, plasticita, schopnost pohlcovat energii atd.). Je proto nutné jednotlivé části a orgány biologického systému izolovat a v prvním přiblížení zkoumat jejich odolnost proti dynamickému působení střely odděleně [5]. I takto chápané izolované orgány však nevykazují ve všech zkušebních vzorcích stejné vlastnosti. Nemají např. stejnou hustotu, napjatost povrchových vrstev i vnitřních struktur tkáně, liší se také obsahem vody, vzduchu, ale také svým stářím. Proto pro dosažení reprodukovatelnosti hodnotících faktorů je nutné nahradit *biologické tkáně* a jejich systémy vhodně zvolenými *náhradními materiály* (NM), které mohou být stejně jako střely jednoznačně definovány a jsou proto

ideální pro vzájemné objektivní porovnání ranivých účinků různých střel.

Konečné hodnocení účinků jednotlivých typů střel (střepin) je dáno jejich působením na člověka, ke kterému dochází za určitých konkrétních podmínek. Neocenitelné jsou v této souvislosti zkušenosti a názory vojenských chirurgů, týkající se střelných poranění, ke kterým dochází v průběhu lokálních válečných konfliktů [1], ale také civilních lékařů, kteří dnes ošetřují tento typ poranění způsobených nehodami při lovu nebo v důsledku násilné trestné činnosti páchané na civilním obyvatelstvu. Jsou to však jednotlivé případy, ve kterých podmínky vzniku těchto poranění nemohou být předem připraveny, jejich průběh ovlivněn a často zde chybí možnost podílet se na jejich odborném vyhodnocení. Přitom analyzovat důsledky střelného poranění není možné okamžitě po jeho vzniku, ale často s určitým časovým odstupem, kdy se projevy střelného poranění změnily a došlo rovněž k výrazné změně fyzikálních, mechanických a biologických charakteristik zasažených tkání.

V odůvodněných případech jsou pro účely hodnocení účinků malorážových střel použita živá zvířata (v anestezii) nebo jejich izolované

¹ Ludvík JUŘÍČEK, doc. Ing. Ph.D., Ústav bezpečnosti, Vysoká škola Karla Engliš, a.s., Mezírka 775/1, 602 00 Brno, tel.+420-728232698, e-mail: ludvik.juricek@vske.cz.

orgány. Za těchto podmínek se však struktura jednotlivých vzorků použité biologické tkáně natolik od sebe liší, že jejich reakce (odezva) na dynamický ráz vyvolaný pronikem střely je velmi proměnlivá. K tomu nedochází při použití ekvivalentních NM, u kterých je dosahováno vyhovující reprodukovatelnosti výsledků. Nicméně pro vzájemné porovnání účinků střel stejné konstrukce na živou tkáň a NM se však bez použití vzorků živé tkáně v budoucnu neobejdeme [9].

1. MÍSTO BALISTICKÉHO EXPERIMENTU V PROCESU ZKOUMÁNÍ RANIVÉ BALISTICKÝCH JEVŮ

Současný stav vědeckého poznání v oblasti ranivé balistiky je charakterizován správným pochopením mechanických základů vzniku střelného poranění, ale existuje řada nejasností v chápání biologických jevů a reakcí člověka na mechanické trauma. Ukazuje se, že celkový ranivý účinek nezávisí pouze na ranivém potenciálu střely a její schopnosti tento potenciál využít, ale i na místě zásahu, směru, tvaru a rozměrech střelného kanálu a aktuálním fyzickým a psychickým stavu zasaženého člověka [3].

Výzkum v ranivé balistice probíhá ve dvou relativně protichůdných úrovních. První řeší problémy spojené se zvyšováním ranivého účinku střeliva v rámci platných mezinárodních norem, druhá úroveň zkoumání řeší pasivní a aktivní ochranu živé síly proti účinkům tohoto střeliva [5], [8]. Vzájemné ovlivňování obou je nesporné.

Mezinárodní spolupráce a výměna zkušeností probíhá na úrovni mezinárodních sympózií a seminářů za účasti diplomatů, zástupců mezinárodních organizací, právníků a expertů na balistiku zranění [2].

Jak již bylo uvedeno, základním metodologickým přístupem k řešení ranivého účinku malorážového střeliva na živou sílu v praxi, je simulace působení střely na živou tkáň. Provádí se experimentálně postřelováním živých tkání nebo náhradních materiálů různého složení. Z ekonomických a především etických důvodů,² se postupně přesunulo těžiště materiálního a technického zabezpečení střeleckých zkoušek od

postřelování zvířat a živých tkání, k postřelování náhradních materiálů [5].

V České republice se provádí statické měření profilu střelného poranění, podle sovětské (ruské) metodiky, po provedené střelbě na petrolát-parafinové bloky (PP 75/25, ČSN 657101) [11], [12] nahrazující biologickou tkáň. Ve světě (USA, Německo, Švédsko, Švýcarsko aj.) se sledují profily střelných poranění dynamickým měřením podle metodiky „NATO“ postřelováním bloků vyrobených z balistické želatiny nebo mýdlové směsi. Sledování procesu vnikání střely do překážky a její chování při pronikání, umožňuje snímání želatinového bloku rychloběžnou kamerou [8]. O vlastnostech, přípravě a zkoušení náhradních materiálů určených pro balistický experiment, bude blíže pojednáno v další části příspěvku.

V poslední době s rozvojem výpočetní techniky byl zaznamenán značný rozvoj programů, vycházejících z identifikace a matematického modelování procesů souvisejících s problémy interakce tuhých soustav [5]. Počítačová simulace procesu pronikání malorážové střely biologickým prostředím a vlastní postřelování náhradních materiálů se v budoucnu mohou stát výchozími komparačními metodami kvantifikované prognózy ranivého účinku nově vyvíjených konstrukcí střeliva bez toho, aby bylo vystřeleno na živý objekt nebo jeho izolovaný orgán.

2. NÁHRADNÍ MATERIÁLY ŽIVÝCH TKÁNÍ A JEJICH CHOVÁNÍ V BALISTICKÉM EXPERIMENTU [6]

Lidské tělo představuje z hlediska ranivé balistiky značně nehomogenní cíl. Je tvořeno prostředími o různých hustotách³ a s odlišnými fyzikálními a biologickými charakteristikami. Tato prostředí, která jsou ostře ohraničena, je možné geometricky jen stěží exaktně definovat. Proto vytvoření fyzikálního modelu, který by plně vyhovoval vlastnostem a parametrům lidského těla, je téměř nemožné. Tyto skutečnosti velmi ztěžují predikci chování střely v lidském těle a tím i závažnost střelného poranění.

Průměrná hustota lidských tkání je přibližně 900 krát větší než hustota vzduchu. Tím jsou dány velmi dobré předpoklady pro rozvinutí terminálně-balistických jevů, ovlivňujících ranivost střel. Na konstrukci dané zbraně

² Ochrana zvířat proti týrání je v ČR zakotvena v „Zákoně č. 246/1992 Sb.“, přijatého ČNR dne 15. 4. 1992. Pro účely experimentálního postřelování živých zvířat (v anestézi), je důležitá III. Část týkající se ochrany pokusných zvířat [5].

³ Průměrná hustota tkání lidského těla je 1 100 kg.m-3, hustota krve je 1 054 kg.m-3, kosti (zuby) mají hustotu 1 650 (2 400) kg.m-3.

a střeliva pak závisí, zda bude ranivý potenciál využit, či nikoliv.

Náhradní materiály biologických tkání, používané v balistickém experimentu, musí vykazovat téměř stejnou hustotu jako má tělesná tkáň ($\rho = 1\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ale také elasticitu, schopnost pohlcení energie střely a odpor proti jejímu pronikání. Proto z těchto důvodů se v počátcích rozvoje ranivé balistiky používaly k experimentálnímu postřelování především *biologické tkáně*. Nositeli těchto tkání byla zvířata a jejich orgány, lidské mrtvoly a v posledních letech byly ve světě k těmto účelům použity i buněčné kultury. Ačkoliv se dnes z ekonomických, ale hlavně z etických důvodů orientujeme na použití *náhradních materiálů*, v opodstatněných případech je použití biologických tkání v balistickém experimentu nezastupitelné.

Problém stanovení *ranivosti* střely se jeví základním problémem pro kvantifikovaný popis základních vlastností střely z pohledu balistiky zranění. Jako míra pro účinek střely byla některými autory zvolena kinetická energie střely E_K nebo jiná vhodně zvolená fyzikální veličina, vycházející z balistických vlastností dopadající střely [6].

Názory autorů na to, kterou fyzikální veličinu zvolit jako objektivní kritérium ranivosti střely a tedy i odolnosti živé síly, se však různí. Tito autoři srovnávají odolnost nechráněné živé síly s odolností tuhé překážky z náhradního materiálu určité tloušťky⁴. Uvedená kritéria, vycházející

z použití pevných náhradních materiálů, mají spíše orientační charakter. Jejich výsledky jsou jen těžko transformovatelné na předpokládaný účinek střely v biologických tkáních, a proto slouží k pouhému srovnání účinku zkoumaných střel určité konstrukce a balistických parametrů [5].

Z důvodů dalšího přiblížení ranivě-balistické simulace k podmínkám pronikání střely do biologických tkání, bylo nutné přejít od postřelování tuhých náhradních materiálů (jedlové dřevo, ocelový nebo duralový plech definované tloušťky) ke střelbě na *plastická média*, která se svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi více blíží vlastnostem měkké biologické tkáně. Bylo ale nutné nalézt takové materiály, kterých hustota, stlačitelnost, elasticita a viskozita, zajistí

⁴ Za ekvivalentní překážku je například považováno měkké jedlové bezsukové dřevo tloušťky 1" (asi 25 mm), ocelový plech tloušťky 1,5 mm nebo duralový plech tloušťky 5 mm.

podobné dynamické chování střel při jejich pronikání, jako svalová tkáň. Nespornou výhodou plastických médií je jejich homogenita v celém objemu experimentálně postřelovaného bloku. Tato homogenita fyzikálních vlastností je důležitá pro kvantitativní popis účinků zkoumaných střel.

Nositeli takových vlastností se staly [5]:⁵

- 10 % a 20 % želatinový roztok (Ž10 a Ž20),
- transparentní glycerinové mýdlo (GM),
- směs petrolátu (75%) a parafinu (25%) (PP 75/25) a
- plastelína (označení PL).

Z důvodů zaměření a omezeného rozsahu článku, se dále omezím pouze na použití a vzájemné porovnání *želatiny*, *mýdla*. U zbývajících plastických NM (PP 75/25 a PL) se zaměřím na jejich použití v balistickém experimentu jako měřicího prostředku (simulátoru) a také chování těchto médií v závislosti na konstrukci a uspořádání střely a použitým zbraňovým systémem.

V tabulce 1 [8] jsou uvedeny některé základní fyzikální a mechanické charakteristiky těchto NM a pro porovnání také základní složky živé tkáně (voda a vzduch). NM z hlediska simulace a hodnocení ranivého účinku malorážových střel na živou sílu (biologickou tkáň) musí vyhovovat těmto požadavkům:

- musí vykazovat přibližně stejnou hodnotu hustoty, případně dalších fyzikálních a mechanických charakteristik, jako skutečné tkáně,
- podobnost v deformaci a rozpadu těla střely (pokud k nim dochází) v NM a tkáni,
- mít srovnatelné odporové charakteristiky proti vnikání střely,
- podobnost v tvorbě dočasné a trvalé dutiny,
- reprodukovatelnost výsledků.

Dalšími požadavky mohou být cena, snadná příprava k měření, skladovatelnost a rovněž možnost archivace (uchování) výsledků měření.

⁵ Vedle těchto médií se k přímému postřelování používaly také hlína a plastelína. Z důvodu značné závislosti vlastností hlíny na obsahu vody, teplotní závislosti plastelíny a obtížné reprodukovatelnosti a archivace výsledků, se tyto materiály dnes k přímému postřelování používají zcela výjimečně.

Tabulka 1

Fyzikální a mechanické charakteristiky NM živé tkáněHustota (ρ); stlačitelnost (κ); dynamická (η) a kinematická (ν) viskozita; rychlost zvuku (c).

Látka	t	ρ	κ	η	ν	c
	°C	[kg.m ⁻³]	[1.Pa ⁻¹]	[Pa.s]	[m ² .s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]
Voda	20	998	4,6.10 ⁻¹⁰	1,0.10 ⁻³	1,00.10 ⁻⁶	1483
	0	1000	5,1.10 ⁻¹⁰	1,8	1,79.10 ⁻³	1403
Glycerín	20	1260	2,2.10 ⁻¹⁰	1,48	1,17.10 ⁻³	1923
	0	-	1,2.10 ⁻⁹	-	-	-
Ethanol	20	789	9,3.10 ⁻¹⁰	1,20.10 ⁻³	1,52.10 ⁻⁶	1170
	0	806	10,2.10 ⁻¹⁰	-	-	1100
Mýdlo (GM)	20	1080	3,4.10 ⁻¹⁰	≈ 5,0.10 ⁻³ a)	≈ 5,0.10 ⁻⁶	1660
Želatina 10% (Ž10)	20	1030	4,2.10 ⁻¹⁰	≈ 40,0 a)	≈ 0,04	1520
	4	-	-	-	-	1486
Želatina 20% (Ž20)	20	1060	3,8.10 ⁻¹⁰	≈ 1,0.10 ⁻² a)	≈ 0,1	1567
	0	-	-	-	-	1541
PP 75/25	20	910-940 b)	-	≈ 10,4.10 ⁻³	-	-
Plastelína (PL)	25	1710 b)	-	≈ 13,9.10 ⁻³	-	-
Vzduch	0	1,23	7,4.10 ⁻⁶	1,72.10 ⁻⁵	1,33.10 ⁻⁵	331

Poznámky:

a) Hodnota látek zjištěná při teplotě 30°C. Měření pod touto teplotou není možné, neboť dynamická viskozita η s klesající teplotou silně vzrůstá.

b) Hodnota stanovená experimentálně v laboratoři Vojenské akademie v Brně.

Zdroj: (SELLIER, K., KNEUBÜHL, B. P., 2001).

2.1 Postřelování želatinyvých bloků

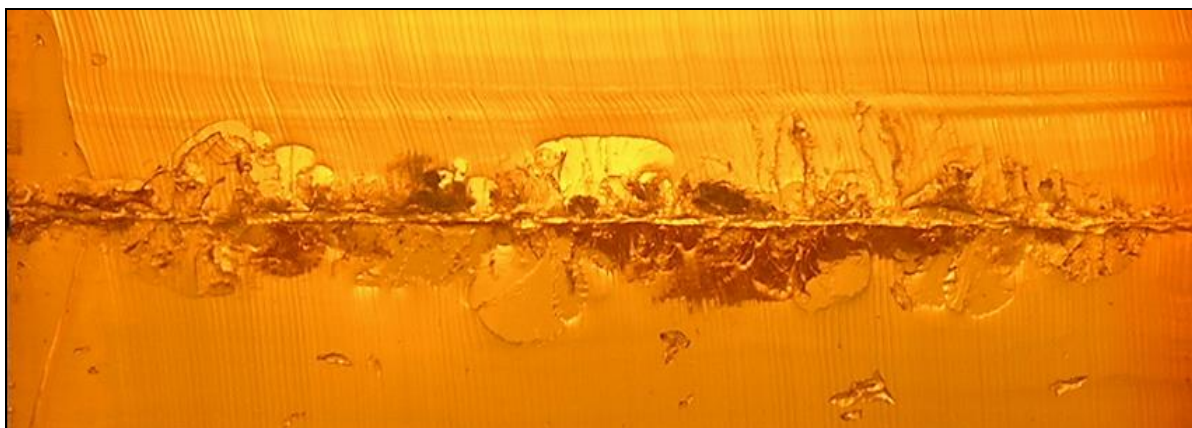
Želatina (Ž) je protein ireverzibilní (nevratné) povahy. Vyrábí se z kůže, kostí nebo šlach hospodářských zvířat. Firmy, zabývající se výrobou želatiny, své receptury přísně tají. Je-li želatina podrobena zatížení, odvodňuje se. Pevnost želatinového gelu závisí na jeho koncentraci a také na teplotě [5], [8].

K experimentálnímu postřelování se z připravené želatiny odlévají bloky o rozměrech 15x15x15 cm (Dynamit Nobel AG), 15x15x35 cm (W. Weigel) nebo 25x25x50 cm (J. Knappworst, M. L. Fackler). Teploty, při kterých jsou bloky postřelovány, jsou 4 °C (M. L. Fackler), 10 °C (NATO) nebo 15 °C (Dynamit Nobel AG). Používané koncentrace želatiny odpovídají 10 % a 20 % roztokům. Pro zabezpečení homogenního rozložení teploty želatinového bloku v celém jeho objemu, je nutná temperace bloků před střelbou po dobu minimálně 12 hodin tak, aby temperace bloku proběhla v celém jeho objemu.

Při použití želatiny k experimentálním účelům se musí počítat s jejím biologickým rozpadem

a se změnou fyzikálních a mechanických vlastností želatiny. Proto příprava želatiny probíhá bezprostředně před jejím upotřebením a z důvodu rychlé tvorby (několika málo dní) plísni, je archivace výsledků experimentu velmi problematická [5]. Především velmi vysoká teplotní závislost želatiny a její biologická nestabilita tvoří hlavní nevýhody tohoto náhradního materiálu.

S analýzou terminálně-balistických jevů v živé tkáni velmi úzce souvisí pojem *profil střelného poranění* (M. L. Fackler a J. A. Malinowski), popisující maximální porušení živé tkáně, které může být od střely dané konstrukce očekáváno. Ve zjednodušeném pojetí je tento profil tvořen *střelným kanálem*, jehož jádrem je *trvalá (permanentní) dutina* (kaverna). Její velikost je určena množstvím ztracených tkání, které pozbyly spojitost se zasaženým organismem nebo orgánem. Trvalou dutinu je třeba odlišovat od *dutiny dočasné*, která vzniká při průchodu střely tkáněmi v důsledku jejich radiální pružné deformace. V želatinovém bloku (obr. 1) [5] jsou obě dutiny jasně zřejmé.



Zdroj: Archív autora.

Obrázek 1. Tvar a velikost střelného kanálu (dočasné dutiny) reprezentovaného systémem radiálních trhlin v transparentním 20% želatinovém bloku od FMJ střely pistolového náboje ráže 9 mm Luger (S & B Vlašim, ČR)

Pro kvantitativní vyjádření účinku střely v tomto prostředí byla J. Knappworstem (Dynamit Nobel AG) vyvinuta *metoda radiálních trhlin*, původně určená pro potřeby vojensko-lékařského výzkumu [8]. Tvar a velikost (objem) dočasné dutiny v želatinovém bloku je představován systémem radiálních trhlin v okolí střelného kanálu, vzniklých přenosem kinetické energie střely na pronikané prostředí.

Takto vzniklé radiální trhliny, svou délkou a hustotou, odpovídají okamžitému množství předané kinetické energie střely ($E_{p\dot{R}}$) v daném místě střelného kanálu. Hodnoty předané kinetické energie $E_{p\dot{R}}$ vybraných druhů pistolových a revolverových střel do želatiny uvádí tabulka 2 [8].

Tabulka 2

Předaná kinetická energie do želatiny vybraných pistolových a revolverových střel
(V. J. M. Di Maio a J. Knappworst - 1974; dálka střelby 15 m)

Ráže	Firma ^{a)}	Střela ^{b)}	m_q	v_d	E_d	$E_{p\dot{R}}$	$E_{p\dot{R}}/E_d$
			[g]	[m.s ⁻¹]	[J]	[J]	[%]
38 Special	Remington	RK	13,0	202	260	78	30
38 Auto	Remington	VM	8,4	315	410	137	33
38 Special	Norma	TMHSp	7,1	407	588	531	92
38 Special	Remington	TMHSp	8,1	288	329	324	99
9mm Parabelum	DNAG	CuR/PSP ^{c)}	5,6	418	489	482	99
9mm Parabelum	DNAG	CuR/PSP ^{d)}	5,65	380	408	300	75
9mm Parabelum	DNAG	MsR/PSP ^{e)}	5,9	380	420	280	67
357 Magnum	Remington	SWC	10,2	363	662	226	34
357 Magnum	S&W	TMHSp	8,1	351	491	380	77
357 Magnum	DNAG	CuR/PSP	7,5	395	579	520	90
357 Magnum	SFM	MsS	2,8	643	568	550	97
357 Magnum	Western	TMHSp	7,1	391	534	533	100
44 Magnum	Remington	TMRK	15,6	381	1110	739	67
44 Magnum	Remington	SWC	15,6	385	1130	862	76
44 Magnum	Remington	TMHSp	15,6	372	1057	974	82
45 Auto	Remington	VM	14,9	248	447	159	35
45 Auto	Remington	TMHSp	12,0	279	460	369	80

Zdroj: SELLIER, K., KNEUBÜHL, B. P., 2001.

Poznámky:

a) Označení firem:

S&W: Smith&Wesson,

DNAG: Dynamit Nobel AG,

SFM: Société française de munitions,

b) Označení střel:

RK: oblá hlava,

VM: celoplášť,

SWC: semiwadcutter,

MsS: plně mosazná, zašpičatělá střela,

TMRK: poloplášť, oblá hlava,

TMHSp: poloplášť, dutá špice,

CuR/PSp: plně měděná střela s oblou hlavou a plastovou špicí,

MsR/PSp: plně mosazná střela s oblou hlavou a plastovou špicí,

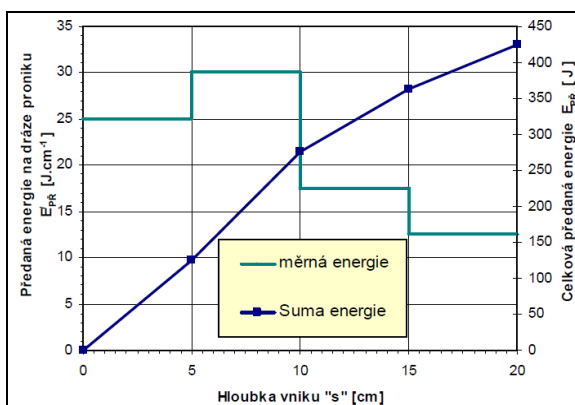
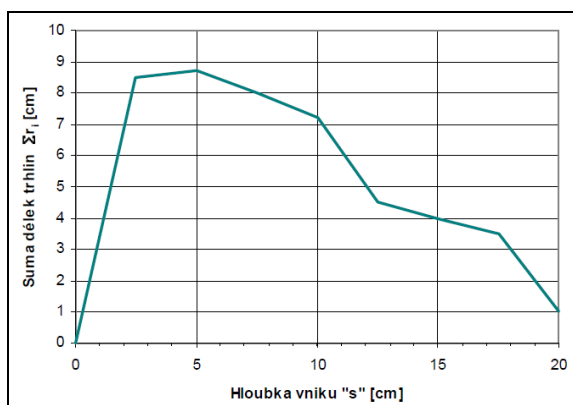
c) Obvyklé označení: ACTION 1,

d) Obvyklé označení: ACTION 2,

e) Obvyklé označení: ACTION 3.

Metoda radiálních trhlin je metodou nepřímou a spočívá ve stanovení součtu délek trhlin v přesně určených úsecích střelného kanálu. Jako výsledek je získán diagram závislosti

součtu délek trhlin $\sum r_i$ na hloubce vniknutí střely s v želatinového bloku (obr. 2 - vlevo).



Zdroj: Archív autora.

Obrázek 2. Předání energie střely 44 Magnum s dutou špicí ($m_q = 15,6 \text{ g}$; $v_d = 372 \text{ m.s}^{-1}$) želatinovému bloku (J. Knappworst).

Poznámky:

Vlevo – předaná energie vyjádřená součtem délek radiálních trhlin $\sum r_i$ v hloubce s,

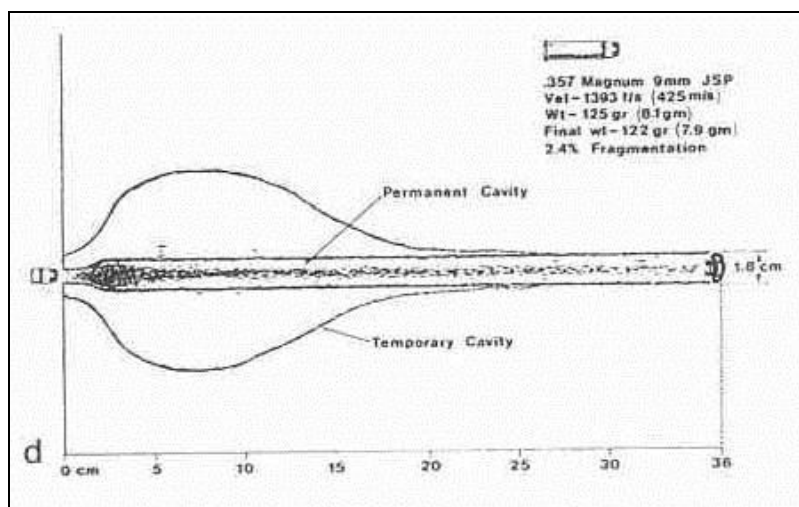
Vpravo – předaná kinetická energie E_{PR} [J] (součtová křivka) a předaná kinetická energie jako funkce uraženého úseku dráhy (děleno po 5 cm) střely E'_{PR} [J.cm⁻¹] v želatinovém bloku (lomená křivka).

Je-li známa celková předaná kinetická energie střely E_{PR} želatinovému bloku (v grafu na obr. 2 - vpravo je označena jako E_{PR}), je možné tuto energii vztáhnout na jednotku hloubky vniku střely $E_{PR/S}$ (ve stejném grafu je označena jako E'_{PR}). V diagramu na obr. 2 - vpravo je rovněž zobrazena součtová křivka předané kinetické energie střely do želatiny (křivka 2) [5].

Vyhodnocení balistického experimentu touto metodou vyžaduje rozřezání želatinového bloku na dostatečně tenké segmenty (2,5 až 5 cm) a následné měření a sumarizace délek trhlin na plochách řezu. To činí tuto metodu velmi pracnou a zdlouhavou [7]. Pak lze přistoupit ke grafickému zobrazení výsledků terminálně-balistického působení malorážové střely v želatinovém bloku. Takto získaný profil

poranění (podle M. L. Facklera a J. Malinowskeho) může být použit jako jisté rozšíření experimentálních metod využívajících balistickou želatinu jako měřicí prostředek pro

hodnocení účinků střel malých ráží na živou tkáň. Charakteristický profil poranění od malorážové střely je vidět na obr. 3 [8].



Zdroj: SELLIER, K., KNEUBÜHL, B. P., 2001.

Obrázek 3. Profil poranění (podle M. L. Facklera a J. A. Malinowskeho, 1985) od 9 mm střely náboje ráže 357 Magnum ($m_q = 8,1 \text{ g}$; $v_0 = 425 \text{ m.s}^{-1}$; 2,4% fragmentů)

Při tvorbě tohoto profilu zranění autoři sledovali čtyři složky účinku malorážové střely na želatinový blok zastupující v experimentu živou tkáň:

- hloubku vniknutí střely do bloku,
- přítomnost fragmentů (dojde-li k rozpadu těla střely),
- velikost (objem) dočasné dutiny a
- velikost trvalé dutiny.

Profil zranění je grafickým popisem účinku střely v balistické želatině,⁶ kdy velikost dočasné dutiny se dá poměrně přesně vyčíst z průběhu vytvořených radiálních trhlin na ploše podélného řezu želatinového bloku. (viz obr. 1).

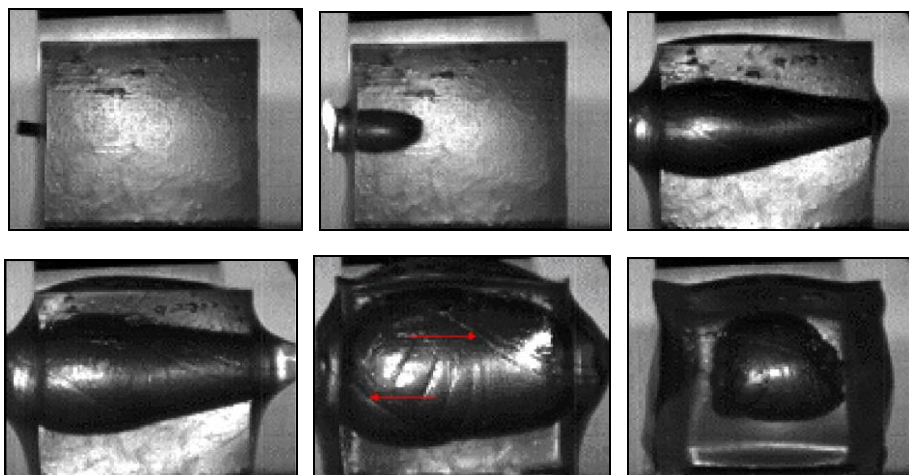
Vyhodnocení experimentu může být doplněno rentgenovým snímkem zachycení fragmentů těla střely v okolí střelného kanálu nebo sérií snímků ze spojitěho záznamu pořízených rychloběžnou kamerou, zachycujících tvar a velikost dočasné dutiny v čase (obr. 4, zleva $t = 0$; 0,2; 0,8; 1,2; 3,0 a 6,0 ms) [6].

Z důvodu transparentnosti želatiny je pro další vyhodnocení výhodné použít kontrastní látku k barevnému zvýraznění dočasné dutiny při balistickém experimentu [5].⁷ Vzájemné porovnání takto získaných střelných kanálů v želatinovém bloku spolu s jejich příčnými řezy ukazuje obr. 5.

Takto vytvořené profily střelného poranění poskytují mnoho cenných informací k vzájemnému porovnání účinků zkoumaných střel a jejich přesnějšímu dodatečnému hodnocení.

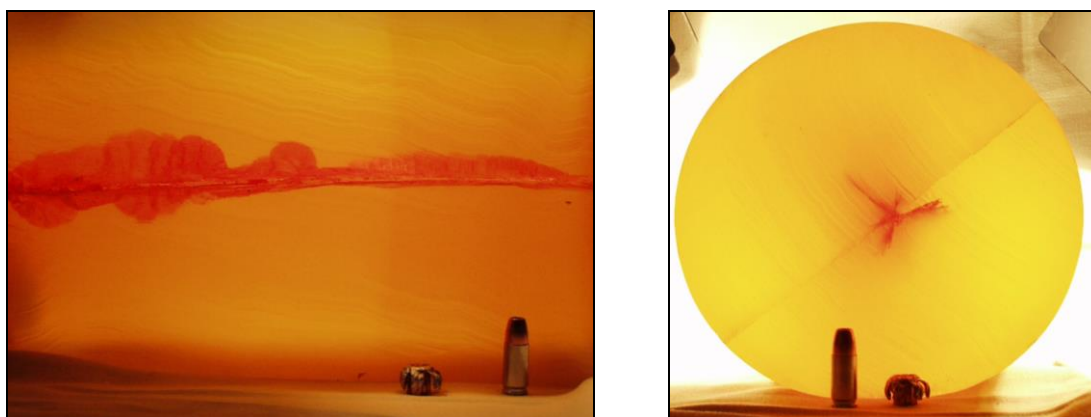
⁶ Autoři použili 10% roztok želatiny v blocích ve tvaru kvádrů o rozměrech 25x25x50 cm. Před postřelováním byly bloky temperovány na teplotu 4°C po dobu 12 hod. tak, aby temperace bloků proběhla v celém jejich objemu.

⁷ Pro barevné zvýraznění tvaru a velikosti dočasné dutiny prezentované v bloku balistické želatiny systémem radiálních trhlin, byl na čelní plochu bloku v místě vstřelu umístěn polyetylenový váček s červenou kontrastní látkou (razítková barva nebo potravinářské barvivo). Použitá barva musí svou hustotou zajišťovat dostatečnou vzlínavost, aby při pulsaci dočasné dutiny tuto spolehlivě vyplnila v celé délce střelného kanálu.



Zdroj: Archív autora.

Obrázek 4. Série snímků ze spojitého záznamu proniku želatínového bloku střelou EFMJ náboje ráže 40 S&W rychloběžnou kamerou Olympus. (Frekvence 20 000 sn.s⁻¹)



Zdroj: Archív autora.

Obrázek 5. Řezy zkušebním blokem 20 % želatiny s dočasnou dutinou zvýrazněnou kontrastní látkou.

Poznámky:

Vlevo – podélný řez blokem v místě střelného kanálu,
Vpravo – příčný řez blokem s radiálními trhlinami.

2.2 Postřelování mýdlových bloků (GM)

Pro experimenty v ranivé balistice jsou používány výhradně *glycerínová mýdla* (litá transparentní mýdla), kterých výroba je relativně nákladná. Přeměna mastných kyselin, jejichž obsah v doposud používaných mýdlech se pohybuje mezi 39 a 43 %, na mýdlo, je zajištěna varem tuků (kokosový olej, ricinový olej a lůj) v louhu sodném. Další přísady při výrobě mýdla tvoří glycerín, ethanol a voda. Přesné receptury jsou přirozeně výrobcí přísně střeženy. Hustota nově vyrobeného mýdla (staré 1 až 3 týdny) činí podle druhu receptury

a v závislosti na teplotě 1.060 až 1.100 kgm⁻³. Mez pružnosti je velmi malá (0,5 MPa) a ukazuje na výrazně plastické chování mýdla. Veličiny, které významně ovlivňují chování střely v mýdle, jsou *rychlost šíření zvuku v mýdle* a jeho *viskozita*. Obě jsou velmi silně teplotně závislé. S rostoucí teplotou jejich hodnota klesá.

Při postřelování se mýdlo chová téměř úplně plasticky. Vzniklý střelný kanál (obr. 6) se po průchodu střelou blokem pouze nepatrně zúží, je ostře ohraničený a představuje svým objemem přímou tvorbu dočasné dutiny.

Objem této dutiny kvantitativně představuje množství ovlivněné biologické tkáně, který se dá technicky velmi jednoduše měřit (vylitím dutiny vodou).

Pro tuto vlastnost je mýdlo používané hlavně k měření množství *odevzdané energie* střely náhradnímu materiálu jako funkce *objemu střelného kanálu* (dočasné dutiny).



Zdroj: Archiv autora.

Obrázek 6. Tvorba střelného kanálu (dočasné dutiny) v mýdlovém bloku FMJ mikrorázovou střelou (ráže do 6 mm a hmotnost 3 až 4 g) puškového náboje ráže 5,56x45

Objem této dutiny V (cm^3) M. L. Fackler (USA), který své experimenty prováděl na mýdle, kritérium účinnosti střely jako funkce velikosti dočasné dutiny vyjádřil vztahem [8]:

$$V = \mu \cdot E_{PR} \quad (1)$$

kde μ je multiplikační součinitel (konstanta) vyjadřující objem dočasné dutiny připadající na jednotku kinetické energie střely předané mýdlovému bloku. Jeho hodnota závisí kromě receptury mýdla a jeho stáří, také na velikosti a uspořádání postřelovaných bloků.⁸ Nezanedbatelná je rovněž teplota mýdlových bloků. E_{PR} je energie střely předaná zasaženému zkušebnímu bloku.

Konstanta μ [cm^3/J] činí pro⁹:

- dočasnou dutinu 0,77 cm^3/J ,
- zónu krevních výronů 0,35 cm^3/J ,
- trvalou dutinu 0,03 cm^3/J .

⁸ B. Kneubühl provedl řadu experimentů, kterými prokázal, že koeficient μ až do množství předané kinetické energie E_{PR} přesahující hodnotu 2500 J, zůstává nezávislý na druhu a konstrukci střely. V tomto rozsahu energií střel si uvedená závislost objemu dočasné dutiny na předané kinetické energii střely zachovává lineární charakter.

⁹ Tyto údaje platí pro svalové tkáně. Z měření provedených Facklerem (1986) je možné počítat s hodnotou konstanty $\mu \approx 1,26 \text{ cm}^3/\text{J}$ pro dočasnou dutinu v želatině. Pro mýdlo platí údaje od 0,16 do 0,20 cm^3/J (v závislosti na stáří mýdla). Pro dočasnou dutinu ve vodě je $\mu = 8,7 \text{ cm}^3/\text{J}$, což je 11 krát více než má svalovina. Za povšimnutí rovněž stojí rozdíl v objemu dočasné dutiny a trvalé dutiny v tkáních. Objem dočasné dutiny je 26 krát (0,77/0,03) větší jak trvalé dutiny.

Pro transformaci naměřených hodnot z experimentálního postřelování mýdla na očekávané hodnoty objemu dočasné dutiny v biologické tkáni, lze předpokládat asi 4 až 5 krát vyšší hodnoty objemu dočasné dutiny ve svalové tkáni jak v mýdle při stejném množství předané kinetické energie střely okolí.

V souvislosti s použitím mýdla jako měřicího prostředku, je nutné upozornit na jevy, které mohou při postřelování mýdlových bloků nastat:¹⁰

- Při postřelování tenkých bloků, kdy dochází k pravidelným průstřelům, se část hmoty přemísťuje ve směru povrchové plochy na straně vstřelu a výstřelu, čímž se celkový objem střelného kanálu zvětší.
- Postřelováním mýdlových bloků menšího příčného průřezu (15x15 cm) střelami o vysoké kinetické energii může dojít v důsledku tvorby dočasné dutiny k vyboulení vnějšího povrchu bloku a nekontrolovatelnému růstu objemu takto vytvořeného střelného kanálu (dočasné dutiny).

Při tvorbě dočasné dutiny v měkkých tkáních dochází k pulsaci dutiny. Doba pulsace¹¹ τ_D závisí na velikosti předané kinetické energie

¹⁰ Pečlivé sledování a vyhodnocování všech nepravidlostí v chování *mýdlového bloku* při jeho postřelování je důležitým předpokladem pro zajištění *reprodukovatelnosti* výsledků měření.

¹¹ Pro předanou kinetickou energii $E_{PR} = 450 \text{ J}$ dosahuje τ hodnotu kolem 15 ms, pro $E_{PR} = 3600 \text{ J}$ odpovídá tato hodnota 30 ms.

E_{PR} střely okolí [8] a je možné ji vypočítat podle empirického vztahu:

$$\tau_D = 2 \cdot \sqrt[3]{E_{PR}} \quad [\text{ms}] \quad (2)$$

Grafické profily střelných kanálů (dočasné dutiny), získané postřelováním bloků mýdla, doplněné milimetrovým měřítkem, umožňují vzájemné porovnání hloubek vniknutí střely, tvaru a velikosti střelného kanálu u střel různé konstrukce a balistických parametrů. Takto získané profily střelných kanálů dávají určitou představu o tom, jaké střelné poranění může

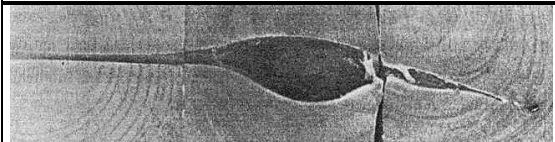
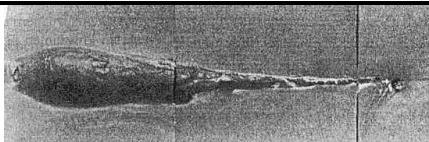
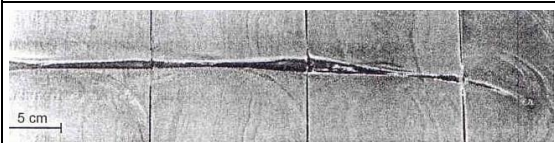
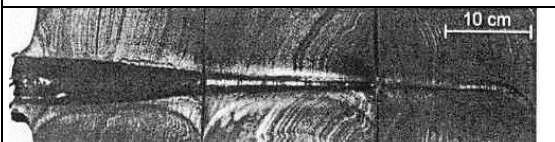
být očekáváno od konkrétního zbraňového systému [7], [8].

Rovněž stopy po fragmentaci těla střely, případně jeho deformace, spolu s množstvím porušené tkáně, mohou být porovnány se sériemi *profilů střelných poranění* k odhadu typu střely, která poranění způsobila.

S ohledem na konstrukci malorážové střely a použitý balistický systém, můžeme obdržet celkově 5 typů střelných kanálů (tab. 3) [8].

Tabulka 3

Typy střelných kanálů v mýdlovém bloku.
(Jednotlivé kanály jsou zobrazeny v přibližně stejném měřítku)

Druh zbraně	Celoplášťové a homogenní střely	Deformovatelné (expanzní) střely a střely s rozkladem těla na fragmenty
Dlouhé zbraně (pušky a kulomety)		
Krátké zbraně (pistole a revolvery)		
Vzduchové zbraně		

Zdroj: SELLIER, K., KNEUBÜHL, B. P., 2001.

Porovnání želatiny a mýdla jako měřicího prostředku

Dlouhá praxe především zahraničních pracovišť potvrdila, že *želatina* a *mýdlo* jsou náhradní materiály velmi dobře se hodící ke studiu ranivě balistických jevů. Přesto ale v některých příznacích vykazují velmi rozdílné vlastnosti. Proto je nutné při volbě konkrétního média, zaměřit se na posouzení jejich pohotovosti k měření, typických rozdílů v jejich chování při postřelování a v neposlední řadě i jejich ceny [5].

- Výroba *želatinových bloků* je poměrně jednoduchá, ale podléhá působení bakterií (tvorba plísní), proto je jejich experimentální použití časově omezené. Naproti tomu mýdlo svými vlastnostmi zaručuje dlouhou

skladovatelnost (řadu měsíců) a neustálou připravenost k použití.

- Příslušná pohotovost k použití při balistických zkouškách leží výrazně na straně *mýdla*. Je necitlivé na změny teplot a jeho fyzikální vlastnosti jsou ovlivněny pouze jeho stárnutím.
- Pro hodnocení velikosti dočasné dutiny, *mýdlo* umožňuje přímé měření objemu dutiny střelného kanálu. Hodnocení velikosti dočasné dutiny vytvořené střelou v *želatině*, je nutné použít nepřímé metody hodnocení z délek trhlin v okolí střelného kanálu, což vyhodnocení výsledků balistického experimentu značně komplikuje.
- Pro zachycení chování střely uvnitř bloku, je výhodnější použití průhledné *želatiny*, která umožňuje využití některé z optických

metod snímání (mžiková fotografie). *Mýdlo* je neprůhledné a proto je nutné k vyhodnocení výsledků balistického měření použít rentgenovou fotografii nebo ultrazvuk, což více koresponduje s technikou snímání biologické tkáně.

- Dynamické chování střely v *želatině* a *mýdle*, v důsledku podobných odporů, se navzájem nijak neliší. Dráhy střel v obou materiálech jsou také podobné. Toto se projevuje také v prakticky stejném průběhu deformace těla střely.
- Výraznou výhodou *mýdla* je dlouhá doba jeho skladovatelnosti, proto se může používat k postřelování i po čtyřech letech skladování, bez výrazné změny svých fyzikálních vlastností¹².

V obou materiálech jsou průběhy rychlostí a hloubky vniknutí střely srovnatelné. Postřelováním 10 % želatiny temperované na 4 °C je dosaženo největší shody mezi simulátorem a svalovou tkání. Tato výhoda je ovšem vykoupena ostatními přednostmi stojícími na straně mýdla, především v jeho okamžité připravenosti k použití.

Z provedeného porovnání obou simulátorů je patrné, že oba si zachovávají výhody a nevýhody přibližně v rovnováze. Proto se v balistickém experimentu využívají oba a o druhu použitého média rozhoduje cíl a zaměření střelecké zkoušky.

2.3 Postřelování bloků ze směsi petrolátu s parafinem (PP 75/25) [4]

Bloky (zkušební terče) o rozměrech 50x50 cm a tloušťky 10 nebo 25 cm se vyrábí ze směsi petrolátu ČSN 6571 50 (75%) a parafinu ČSN 6571 01 druh 250/52 (25%) v souladu se sovětskou (ruskou) metodikou. Tato směs se svou hustotou ($\rho = 910 - 930 \text{ kg.m}^{-3}$) a balistickými vlastnostmi blíží vlastnostem mýdla. Je výrazně plastická, neprůhledná, hnědé barvy, s velmi malou hodnotou meze pružnosti [4], [5].

Na rozdíl od *želatiny* a *mýdla*, které se používají v zahraničí, byly v České republice v minulosti s tímto materiálem provedeny zkoušky k prověření vlivu základních konstrukčních a balistických charakteristik

¹² Vlivem stárnutí z mýdla při vysychání uniká alkohol a voda, jeho hustota s časem roste (po 4 letech skladování $\rho = 1150 \text{ kg.m}^{-3}$), čímž úměrně vzrůstá odpor mýdla proti vnikání střely do mýdlového bloku. Výsledný objem dutiny u staršího mýdla je jen nepatrně menší. Toto je způsobeno zvýšením odporu při probíjení sušší povrchové vrstvy mýdlového bloku [8].

malorážové střely na její ranivý účinek v biologické tkáni.

Postřelování náhradního materiálu tohoto typu umožňuje určit nejen pravděpodobnou velikost střelného kanálu, vytvořeného průchodem střely, ale i oblast *spojitého* a *nespojitého* narušení tkáně v okolí střelného kanálu, způsobené dynamickým působením rázové vlny během proniku střely. Narušená oblast se po provedeném podélném řezu blokem v místě kanálu projevuje změnou zabarvení směsi (obr. 7).

Ke kvantitativnímu určení stupně ranivého účinku malorážových střel byla v roce 1984 sestavena a schválena „*Metodika zjišťování a vyhodnocování účinků malorážových střel na nechráněnou živou sílu*“ [4]. Zpracovatelem této metodiky byl VVÚ ZVS Brno. Tato metodika stanovuje podmínky, za kterých probíhá postřelování petrolátových bloků (terčů). Do jednoho bloku jsou postupně umístěny čtyři zásahy. Uprostřed plochy, v průsečíku úhlopříček, se nachází bod určený ke kontrole kvality směsi.¹³

Při střelbě jsou měřeny dopadová v_d a výletová v_v rychlost střely a z jejich rozdílu se stanoví hodnota kinetické energie střely předané terči E_{PR} podle vztahu:

$$E_{PR} = \frac{1}{2} \cdot m_q \cdot (v_d^2 - v_v^2) \quad [\text{J}] \quad (3)$$

Hodnotě předané kinetické energie střely postřelovanému médiu je přímo úměrná velikost objemu střelného kanálu V_Z , který podobně jako v mýdle, je měřitelný přímo vylitím dutiny vodou. Kromě toho lze rovněž určit objem střelného kanálu (dočasné dutiny) spolu s oblastí spojitě narušené tkáně V_{Z+P} pomocí empiricky odvozených vztahů uvedených v již zmíněné metodice [4].

$$V_Z = 1,75 \cdot 10^{-4} \cdot E_{PR}^{1,764} \quad [\text{cm}^3] \quad (4)$$

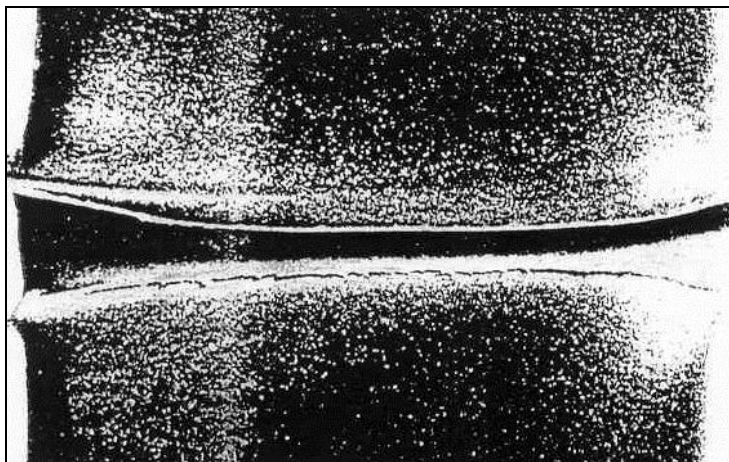
$$V_{Z+P} = 34,6 \cdot 10^{-4} \cdot E_{PR}^{1,643} \quad [\text{cm}^3] \quad (5)$$

Tyto objemy, určující stupeň narušení tkání, jsou kritériem účinků malorážové střely, které lze očekávat u střely dané konstrukce

¹³ Kontrola kvality směsi zkušební bloku (terče) se provádí dynamicky zjednodušenou *pádovou zkouškou*. Na čelní plochu bloku, temperovaného na teplotu 20 až 25 °C, umístěného na pevné podložce, je spuštěna z předem definované výšky (2 m) volným pádem jehla průměru 5 mm se závažím o hmotnosti 5,6 kg. Měřítlem kvality směsi je hloubka vpichu hmotné jehly, která podle metodiky má dosahovat hodnotu $h_k = 19 \pm 1 \text{ cm}$.

a balistických parametrů v biologických tkáních. Po provedené střelbě jsou bloky rozřezány v místě střelného kanálu. Takto získané podélné řezy slouží k vytvoření *grafických profilů* účinků střely, umožňujících přímé porovnání posuzovaných střel.

Pro experimentální využití tohoto média hovoří kromě jeho malé tepelné závislosti (teplota postřelování 20-30°C) a snadné přípravy k použití, také nízká cena vstupních surovin, možnost recyklace a dlouhá doba životnosti směsi (mnoho let).



Zdroj: JURKÁČEK, B., 1984.

Obrázek 7. Podélný řez blokem PP 75/25 v místě střelného kanálu.
(Na obrázku je vidět rozhraní ploch se *spojitě* a *nespojité* narušenou tkání).

2.4 Využití plastelíny v balistickém experimentu

Plastelína (PL), jako náhradní materiál biologické tkáně, se k přímému postřelování za účelem zkoumání ranivosti malorážových střel, používá jen výjimečně.¹⁴ Přesto bylo u nás v nedávné minulosti provedeno několik ranivě-balistických hodnocení malorážového střeliva s využitím plastelínových bloků [5], [7].

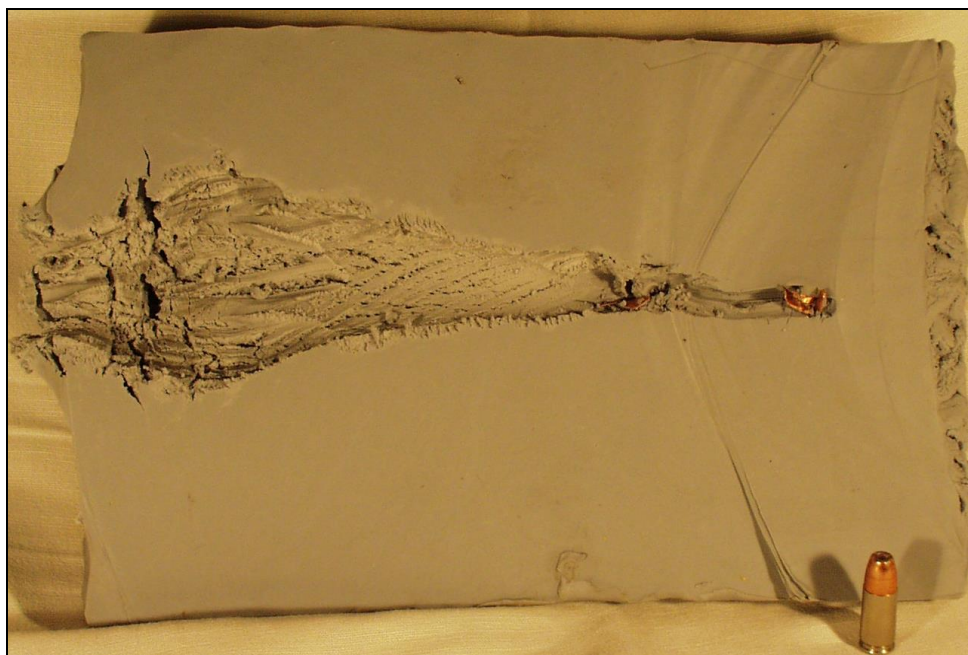
Balistické experimenty se vyznačovaly velmi náročnou přípravou zkušebních bloků (mechanické přechování plastelíny do forem) a jejich značnými destrukcemi po dynamické zátěži při postřelování. Objem takto získaného střelného kanálu, který představuje, podobně jako u mýdla, svým tvarem a uspořádáním dočasnou dutinu je několikrát větší jako u směsi PP 75/25. Kvantitativně lépe odpovídá velikosti dočasné dutiny ve skutečné biologické tkáni což usnadňuje transformaci dočasné dutiny vytvořené v NM na dutinu skutečnou.

Zajímavým jevem, ke kterému v průběhu zkoušek došlo, byl vznik četných trhlin na vnitřní ploše střelného kanálu (viz obr. 8) i přes značnou plastičnost tohoto média. Svým tvarem a uspořádáním trhliny odpovídaly rotačnímu pohybu střely při jejím proniku blokem (vznik šroubovice). Strukturálně hmota plastelíny na vnitřní ploše střelného kanálu byla suchá s výraznou ztrátou své původní plasticity [5].

Ve světě, ale i u nás se plastelína používá především ke zkouškám odolnosti ochranných prostředků před účinky střel, střepin a bodných zbraní. Svou hustotou plastelína převyšuje již zmíněné plastické NM a v závislosti na stupni stlačení při jejím přechování do rozebíratelných forem, hustota dosahuje hodnot $\rho = 1.400$ až 1.700 kg.m^{-3} .

Pro tyto účely se ve světě používá řada mezinárodně platných norem, určených k provádění a hodnocení balistických zkoušek osobních ochranných prostředků (DIN 52 290-1, 2; U.S. Standard 0101.03 NIJ; Önorm S 1310, 1312; STANAG 2920 nebo AK II).

¹⁴ Pro svou výraznou *plasticitu*, která je ještě vyšší než u *mýdla* nebo směsi PP 75/25, se postřelování *plastelíny* používá za účelem zjišťování celkového objemu dočasné dutiny, který je kritériem účinnosti zkoumaného malorážového střeliva.



Zdroj: Archív autora.

Obrázek 8. **Podélný řez blokem standardní plastelíny (modelovací hmota šedá) v místě střelného kanálu.**

(Na obrázku je vidět typický tvar dutiny střelného kanálu vytvořeného v plastelině expanzní střelou pistolového náboje ráže 9 mm)

V České republice byla v roce 1995 Českým normalizačním institutem (ČNI) Praha uvedena v platnost norma ČSN 395360 [13], určená k provádění zkoušek odolnosti ochranných prostředků proti střelám, střepinám a bodným zbraním, kdy se plastelína, jako náhradní materiál, podle metodik zapracovaných do těchto norem, používá jako podkladový materiál.

ZÁVĚR

Ve svém příspěvku jsem se z důvodu omezeného rozsahu nemohl zabývat úplným výčtem náhradních materiálů biologických tkání a použitím metodik pro vyhodnocení výsledků balistických experimentů při jejich postřelování. Jistě by si zasloužil vlastní pozornost každý náhradní materiál, který našel v tomto oboru své uplatnění.

Proto jsem se omezil pouze na nejpoužívanější plastická média, která se svými fyzikálními a balistickými vlastnostmi svalové tkáni blíží nejvíce a vykazují tak nejvyšší kritérium shody.

I tak je z uvedeného patrné, že ani jeden z dnes používaných náhradních materiálů plně nevyhovuje daným požadavkům. Bude tedy nutné v balistickém experimentu i v budoucnu uvedené náhradní materiály kombinovat v závislosti na účelu a cílech balistického experimentu.

Z výše uvedeného je zřejmé, že snaha o nalezení univerzálního náhradního materiálu, který by v balistickém experimentu plně nahradil biologické tkáně, je zatím utopickým snem.

LITERATÚRA

- [1] BENEŠ, A. *Chirurgie (Válečné lékařské obory)*. Praha, Naše vojsko 1980.
- [2] COUPLAND, R. M. *The Red Cross Wound classification*. ICRC, Geneva 1997.
- [3] HIRT, M. *Střelná poranění v soudním lékařství*. Brno: ÚSL LF MU, Brno 1996.
- [4] JURKÁČEK, B. *Návrh metodiky zjišťování a vyhodnocování účinků malorážových střel na živou sílu*. Brno: VVÚ ZVS Brno, 1984.
- [5] JUŘÍČEK, L. *Fyzikální modely biologických systémů člověka v balistickém experimentu pro hodnocení ranivých účinků malorážových střel*. [Habilitační práce]. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2003, 182 s.

- [6] JUŘÍČEK, L. Ranivá balistika I. (Úvod do studia ranivé balistiky). Brno: VŠKE, a.s. Brno, 2013, 112 s. ISBN 978-80-86710-69-3.
- [7] KOMENDA, J., JUŘÍČEK, L., ROUBAL, P., FOLVARSKÝ, J. *Střelná poranění a ranivá balistika*. Praha: Střelecká revue, 1999, roč. 31, č. 1 - 4, 8 s.
- [8] SELLIER, K. - KNEUBÜHL, B. P. *Wundballistik und ihre ballistischen Grundlagen*. Berlin, 2. völlig überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Verlag Berlin Heidelberg, Saladruck, Berlin. 2001, 526 s. ISBN 3-540-66604-4.
- [9] VYKOUŘIL, L. a kol. *Válečná chirurgie. Vybrané stati z válečné chirurgie pro pregraduální studium I. a II. díl.*, Hradec Králové: VLA v Hradci Králové, svazek 320, 322, 2000.
- [10] ČSN 39 5002-1: *Civilní střelené zbraně a střelivo - všeobecné termíny a definice*. Praha: ČSN I, Praha 1995.
- [11] ČSN 65 71 01: *Parafíny*. Praha 1960.
- [12] ČSN 65 71 50: *Petrolát*. Praha 1955.
- [13] ČSN 395360: *Zkoušky odolnosti ochranných prostředků*. ČSN I, Praha 1995.