

UNIVERZITA KARLOVA
Fakulta tělesné výchovy a sportu

**Simulace a experimentální hodnocení účinků malorážového
střeliva vznikajících pod balistickou ochrannou pomůckou**

AUTOREFERÁT

Doktorská disertační práce

Vypracoval:

MUDr. Mgr. Richard Billich

Praha, 2019

Abstrakt

Název: Simulace a experimentální hodnocení účinků malorážového střeliva vznikajících pod balistickou ochrannou pomůckou

Cíle: Mezi hlavní cíle patří parametrizace ranivých účinků v uměle vytvořených materiálech. Kvantifikace účinků zbraňových systémů pomocí mezinárodních a experimentálních kritérií účinnosti. Parametrizace mechanických charakteristik polymerních vláken, které jsou součástí balistických ochranných vest. Objektivizace deformačních účinků střely v měkkých biologických strukturách a vytvoření zjednodušené analýzy interakce střely s balistickou vestou.

Metody: V experimentu byly použity náhradní materiály - balistická želatina a glycerínové mýdlo. Vypočtené hodnoty a jednotlivé parametry jsou uváděny pro zbraňové systémy ráže 9 mm. Experiment se uskutečnil v certifikované balistické laboratoři. Parametrizace tvarových změn probíhala pomocí zobrazovacích metod CT; Mikro CT; UZ Elastografie; 3D scanner, další nezbytnými zařízeními byly infračervená vibrační spektroskopie a vysoko-frekvenční kamera. V neposlední řadě vytvoření analytických vztahů stanovující mechanické účinky na materiál za balistickou vestou.

Výsledky: Oblast největšího zasažení pro užití munice byl 1.48 - 1.6 násobek průměru použitého projektilu. V průběhu šíření se deformační vlny v náhradním materiálu dochází k zestržení konvektivní vlny a náhle skokové deformaci s lokálně velkou disipací mechanické energie ve vzdálenosti 64.35 ± 21.45 mm pod BOP. Vzhledem k maximálnímu zrychlení rovinné ($82.3 \text{ m}^2/\text{s}$) a osově symetrické vlny ($10.1 \text{ m}^2/\text{s}$), jsme schopni predikovat traumatické poškození měkkých tkání v organismu.

Klíčová slova: Ranivá balistika, substituční materiály, kritéria účinnosti střely, balistické vesty, interakce střely, deformační vlna, traumatické poškození

1 ÚVOD

Balistika provází člověka již od počátku jeho existence. První cíleně hozený kámen, kost či jiný podobný předmět, představovaly bez velké nadsázky - historické milníky, od kterých se začaly odvíjet empirické základy balistiky. Uvedením prvních mechanických zbraní - oštěpů, šípů, koulí - nastal další rozvoj balistiky, a to ve smyslu získávání praktických střeleckých dovedností (Juříček, 2017).

Skutečný průlom balistika doznala až s nástupem palných zbraní, kdy problematika vzniku střelných poranění a jejich následků je neustále v popředí zájmu širokého spektra nejrozumnějších **vědních oborů** - technických, medicínských, interdisciplinárních (Roberts et al., 2007).

Střelná poranění, jsou vedle střepinových poranění z hlediska četnosti, dominantní skupinou válečných poranění v podmínkách použití konvenčních zbraní. Také v rámci civilních "zbrojních" aktivit se střelná poranění objevují stále častěji.

Lidské tkáně a živé organismy jsou z mechanického hlediska velmi složité a mají těžko předvídatelné chování. Vzhledem k vrstevnatému uspořádání lidské tkáně (kůže, podkožní vazivo, svalová tkáň, vnitřní orgány apod.) je nezbytné **stanovení elasticity** jednotlivých vrstev. Výzkumy zůstávají kontroverzní, při provádění experimentálního testování na živých (lidských) tkáních. Nejen vysoká finanční či časová náročnost, ale také **pohled lékařské etiky**, je hlavním důvodem pro omezení testování na lidských ostatcích či lidských subjektech přímo.

Víceleté praxe převážně ze zahraničních pracovišť (Jusilla, 2004; Salibury, 2009; Parker et al., 2012; Susu et al., 2016) potvrzují, že zkoumání ranivých účinků střel je v současnosti realizováno pomocí experimentů na modelových systémech, vyrobených ze **substitučních materiálů** (balistická želatina, glycerínové mýdlo). Tyto náhradní materiály, jejichž vlastnosti se přibližují měkkým tkáním lidského organismu, neumožňují výzkum reakce živého organismu sledováním změn jeho fyziologických a reologických projevů (krevní tlak, tep, apod.), nicméně pro výzkum účinku střely z energetického hlediska jsou nejvhodnější alternativou. Biologický materiál má specifické vlastnosti a velmi často se chová neNewtonovsky. Hlavním důvodem je reaktibilita prostřednictvím inervace. Poranění tkání vyvolává v organismu celou řadu **reakcí komplexního charakteru**.

V experimentu byly ke střelbě použity převážně zbraňové systémy ráže 9 mm tvořící skupinu typických zástupců vojenského střeliva Armády České republiky, ale i ostatních zemí. Mezi zástupce balistických ochranných pomůcek patří materiály složené z para-aramidových vláken, dále pak vlákna tvořena vysokomolekulárním polyetylenem. Experimentální vzorky jsou řazeny do balistické odolnosti III podle NIJ klasifikace.

Předložená doktorská disertační práce je rozdělena do dílčích celků. Teoretická část řeší uvedenou problematiku s ohledem na terminálně-balistické působení střely na cíl biologické povahy.

Experimentální část je rozdělena do tří samostatných kapitol:

- *experimentální část I.*

- *kritéria účinnosti, parametrizace střelného kanálu v NM, účinky munice v NM bez použití BOP*

- *experimentální část II.*

- *zátěžové zkoušky experimentální BOP, mechanické charakteristiky polymerních vláken, mikroskopická dokumentace*

- *experimentální část III.*

- *predikce účinků v měkkých tkáních pod BOP, analýza interakce střely s BOP, stanovení dynamických účinků projektilu*

Kvantifikované hodnocení účinků střel na živou sílu je prováděno u nás, i ve světě, pomocí tzv. **kritérií účinnosti**. Získaná data jsou využívána k posouzení nebezpečnosti střel. Uvedená kritéria pro puškové a pistolové střelivo vyjadřují v podstatě potenciál střely zranit, její faktický efekt je vyjádřen příslušnou hodnotou každého kritéria. Interpretace kritérií a jejich hodnot jsou určeny, buď výhradně na základě hodnot výchozích fyzikálních veličin (např. hybnosti střely), nebo rozsáhlými statistickými výzkumy. Dominantní význam má často také velikost ráže. Praktickým a měřitelným kvantifikátorem kinetické energie střely je její rychlost. Z přebytku kinetické energie střely po proniknutí do materiálu lze pak při znalosti jeho kontaktních charakteristik dopočítat hloubku penetrace. Pro hodnocení účinku střely na konkrétní cíl je významný nejen tvar střelného kanálu po ustálení celého děje, ale i během pronikání střely materiálem.

Lidské tělo je proti účinkům střelných zbraní zcela neodolné, proto je potřeba jej ochraňovat pomocí **balistických ochranných pomůcek**. Funkce neprůstřelné vesty spočívá na principu snížení dopadové energie střely tím, že se střela zachytí do jednotlivých vláken balistického vrstev. Zbytek této energie se i přesto přenesl jako vlna nesoucí kinetickou a tlakovou energii do materiálu za ním (lidský organismus, zvíře, viskoelastické těleso). Vzhledem k širokému rozšíření palných zbraní a jejich zvyšující se účinností, je nutné exponenciálně zvyšovat experimentální bádání v oblasti BOP a to nejen u příslušníků ozbrojených a bezpečnostních složek. Dosažené výsledky mechanických charakteristik polymerních vláken pomocí zátěžových zkoušek mají dále význam pro konstruktéry a balistické pracoviště zabývající se následnou výrobou BOP.

V poslední experimentální části se snažíme o zjednodušenou analýzu interakce střely a BOP. Výsledkem jsou analytické vztahy stanovující **mechanické účinky** na materiál umístěny za neprůstřelnou vestou. Mezi hlavní sledované parametry patří - maximální hloubka průhybu, velikost deformace, parametry postupující tlakové vlny a další - na základě těchto dynamických účinků projektilu jsme schopni dopočítat **oblast maximální deformace** tj. oblast, která je vystavena největším traumatizujícím účinkům pro experimentální zbraňový systém.

Balistické experimenty byly prováděny v normovaných **balistických laboratořích**, technologických výzkumných centrech a laboratořích pro měření extrémní zátěže. K simulaci účinků střel na živou tkáň bylo vyrobeno experimentální zařízení.

Na základě volených parametrů, pohyblivé podložky s volně položeným balistickým blokem je možno výsledky experimentu porovnávat s reálnou situací, včetně výchylky tělesa po impaktu.

Použitím vysokorychlostní kamery a transparentního náhradního materiálu jsme schopni analyzovat v umělému materiálu přesný průběh mechanického přenosu vlnění, rychlost střely, analyzovat odezvu bloku na průnik střely, stanovit okamžitý tvar, rozměry a objem dočasné dutiny ve zvoleném okamžiku, časové změny. Pomocí softwaru a vhodných analytických vztahů je umožněno dopočítat mechanické účinky v náhradním materiálu za BOP a tím **predikovat účinky** na biologickém subjektu.

Nedílnou součástí jsou zobrazovací metody např. počítačová tomografie, elastografie nebo 3D scanner.

2 PROBLÉM

2.1 Právní hlediska problému

Základy ranivé balistiky jako vědního oboru byly položeny v polovině 19. století v souvislosti se zavedením malorážových výbušných střel a expanzivních střel typu **Dum-Dum**, používaných v koloniálních válkách. Do této doby spadají i první snahy o právní regulaci vojenských zbraní a střeliva s vysokým ranivým účinkem v mezinárodním měřítku. K mezinárodním úmluvám válečného práva (v historickém pořadí) patří dle Jussila (2004):

- **Petrohradská deklarace o zákazu používání výbušných nábojů ve válce (1868)**, v níž se smluvní strany zavazují upustit od použití jakýchkoliv nábojů o hmotnosti nižší jak 400 g s výbušnými střelami nebo střelami s třaskavou nebo zápalnou látkou.
- **Haagská úmluva o zákonech a obyčejích pozemní války (1899)**, zakazuje použití nábojů se zplošťujícími se nebo rozšiřujícími se (tzv. expanzivními) střelami.
- **Haagská úmluva o zákonech a obyčejích pozemní války (1907)**, jejíž Řád pozemní války v čl. 22 a 23 uvádí, že válčící strany nemají neomezené právo při výběru prostředků k poškození nepřítele a zakazuje používat jed nebo otrávené prvky střel a dále zbraně, střely nebo látky, které mohou způsobit zbytečné útrapy.
- **Všeobecná deklarace lidských práv Organizace spojených národů z roku 1948** toto prohlašuje "Každý má právo na život, svobodu a bezpečnost osoby" (článek 3), a to "Nikdo nesmí být vystaven mučení ani jinému krutému, nelidskému či ponižujícímu zacházení nebo trestu" (článek 5).
- **Ženevské úmluvy (1949)**, které v dodatkovém protokolu o ochraně obětí mezinárodních ozbrojených konfliktů (1977) mimo jiné stanovují:
 - v ozbrojeném konfliktu nemají strany v konfliktu neomezené právo volby způsobů a prostředků vedení války,
 - je zakázáno používat zbraně, munici, materiály a způsoby vedení války, které by svou povahou způsobovaly nadměrná zranění nebo zbytečné útrapy.

2.2 Etická hlediska problému

Balistické zkoumání ranivých účinků střel je s ohledem na etické důvody realizováno zpravidla na **živých zvířatech** (méně často) **izolovaných orgánech zvířat** nebo na **modelových cílech**, vyrobených z **náhradních materiálů** (balistická želatina, mýdlo, směs petrolátu a parafinu apod.).

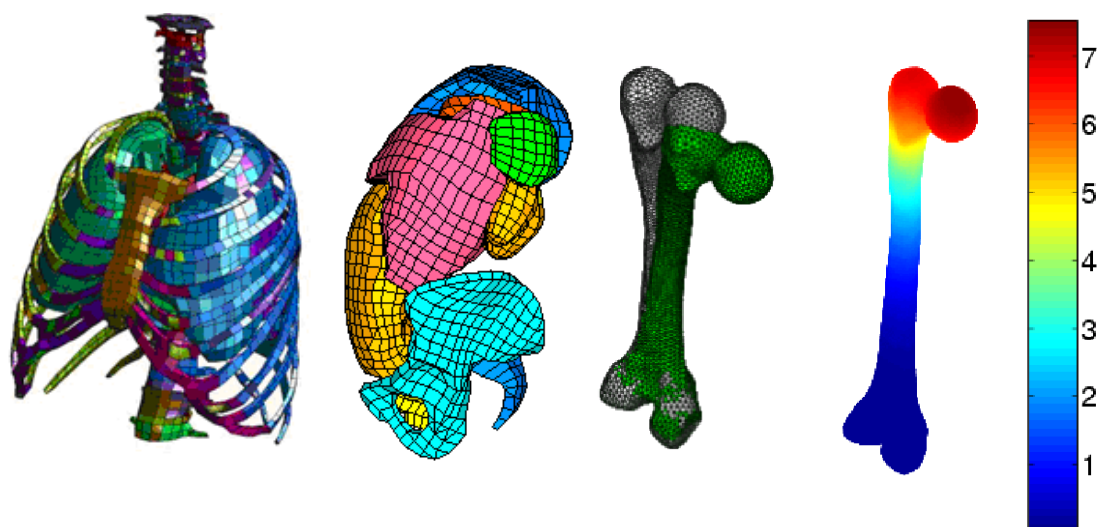
Výzkumy (Farjo & Miclau 1997; Cunningham et al., 2003; Kneubüehl et al., 2008), provádějící experimentální testování na živých (lidských) tkání, vyvolávají značnou **kontroverzi z etických důvodů**. Náhradním možným řešením je využití simulace pomocí umělých materiálů, jejichž hustota a viskozita se přibližuje měkkým tkáním lidského organismu. Významným zdrojem poznání jsou však i skutečná střelná poranění, ke kterým v současné době dochází stále častěji.

Mezinárodní výbor Červeného kříže **ICRC** (*The International Committee of the Red Cross*) se sídlem v Ženevě, který byl založen v roce 1863. Z jeho iniciativy vznikly po 2. světové válce **Ženevské úmluvy**, podepsané 165 zeměmi. V rámci těchto úmluv má ICRC mandát pro humanitární aktivity v ozbrojených konfliktech a významný podíl v těchto aktivitách zaujímá chirurgická péče nejen o válečné, ale i o civilní oběti v místech s chybějící nebo nedostatečnou zdravotnickou strukturou. Za posledních deset let získal ICRC rozsáhlé zkušenosti s popisem a chirurgickou léčbou střelných poranění. Chirurgové ICRC mají dnes v celosvětovém měřítku největší zkušenosti s léčbou střelných poranění.

Od 90. let se pravidelně konají mezinárodní konference za účasti diplomatů, zástupců mezinárodních organizací i expertů na ranivou balistiku organizované ICRC. Jejich cílem je přesvědčit světovou odbornou veřejnost o nehumánních aspektech bojového použití uvedených zbraňových systémů (Coupland, 1991).

Střelivo se zvýšeným ranivým účinkem je omezováno i v civilním sektoru. Např. střelivo s expanzivními, snadno se deformujícími a zplošťujícími se střelami (s výjimkou střeliva loveckého) je ve většině civilizovaných zemí **střelivem zakázaným**, které není možné držet ani používat ke střelbě. To platí jak pro Evropskou unii, v níž je právní prostředí v oblasti zbraní a střeliva vymezeno směrnicí [64]. V České republice je toto prostředí vymezeno zákonem [67], podle něhož se k zakázanému střelivu řadí mj. střelivo se střelou výbušnou, zápalnou, stejně jako každou střelou pro krátkou kulovou zbraň se zvýšeným ranivým účinkem (§ 4 zákon) (Komenda & Juříček, 1993).

Století intenzivního rozvoje koncové balistiky živých cílů je charakteristické přechodem od zkoumání poranění živých cílů k analýzám vhodných substitucí neživé povahy. Náhradní modely sice nemohou dát komplexní odpověď na otázky ranivé schopnosti určitého systému, jsou však výhodné z řady hledisek (ekonomická, technická, etická). Za produkt nejvyššího stupně vývoje ranivé balistiky lze považovat **matematické modely**, které simulují pronik střely náhradním materiálem, resp. živou tkání a vyhodnocují jejich odezvu včetně predikce očekávaného zranění.



Matematická modelace lidských orgánů pro výpočet ranivých účinků a predikce očekávaného zranění (Cooper & Taylor, 2015)

3 STŘELA A JEJÍ ÚČINEK

3.1 Charakteristika použité munice v experimentu

Ve snaze přispět k objasnění některých typických jevů (velikost dočasné a permanentní dutiny) při průniku střel tohoto typu měkkými částmi živých tkání jsme provedli balistický experiment, založený na postřelování bloků simulujících živou tkáň. Použili jsme **zbraňové systémy ráže 9 mm** (9 mm Luger FMJ, .357 Magnum FMJ, 9 mm Luger Fiocchi Black Mamba) ráže 7.62 (Tokarev 7,62x25 FMJ) a výjimku tvořily dva zbraňové systémy ráže 9 mm (.357 Magnum GOLD DOT), který patří mezi moderní náboje s výkonnou expanzivní střelou působící se zvýšeným účinkem, dále pak .44 Magnum Remington ráže 13 mm.

Tyto střely s nízkou dopadovou rychlostí zasahují in vivo pouze ty tkáně, s nimiž přichází do bezprostředního styku (Komenda et al., 2013).

Základní konstrukční a balistické údaje těchto nábojů do pistole a revolveru použitých při experimentech jsou uvedeny v *tabulce č.1*.

Tab. 1 Základní konstrukční charakteristiky zkoumaných nábojů
[experimentální data]

NÁBOJ	VÝROBCE	RÁŽE	TYP STŘELY	HMOTNOST NÁBOJE	HMOTNOST STŘELY	DÉLKA NÁBOJE	DÉLKA NÁBOJNICE
				[g]	[g]	[mm]	[mm]
LUGER	S & B	8.84	FMJ-RN	12.4	7.5	29.35	19.15
BLACK MAMBA	Fiocchi	9.00	FMJ - FP	11.3	6,5	27.15	14.7
7.62x25 Tokarev	S & B	7.63	FMJ	10.27	5.6	35.2	25.0
.357 MAGNUM	S & B	9.07	FMJ-FP	15.3	10.25	39.9	32.0
.357 GOLD DOT	Speer	8.80	GDHP	12.8	8.1	39.5	31.9
.44 Rem. Mag	Remington	13.05	SJSP FLAT	15.55	11.60	40.89	32.64

Legenda: **FMJ** - Full Metal Jacket - celoplášťová střela, **GDHP** - Gold Dot Hollow Point - střela s řízenou deformací, **FMJ-RN** - celoplášťovaná ogivální střela se zakulacenou špičkou, **FMJ – FP** - celoplášťovou střelu s přední částí tvaru komolého kužele, **SJSP FLAT** (Semi-Jacketed Soft Point) poloplášťová střela s komolým kuželem, **S & B** - Sellier & Bellot, Vlašim, ČR, **Fiocchi** - nejstarší Italská továrna pro výrobu nábojů, **Remington, Speer** - Americké továrny na výrobu munice

Poznámka: Hollow Point, někdy nazýváno jako "DUM-DUM" je střela, která má ve své přední části dutinku. Ta je určena zejména k tomu, aby po vstupu do svého cíle došlo k její expanzi. To má za následek jednak snížení penetrace ale také větší poškození tkání



Obr. 1 Fotodokumentace použitých zbraňových systémů (zleva) - Luger 9mm, Black mamba 9 mm, Tokarev 7,62 x 25 olověné jádro, Tokarev 7,62x25 ocelové jádro, .357 Magnum 9mm., Gold Dot 9 mm, .44 Remington Magnum [experimentální data]



Obr. 2 Ukázka použitých zbraňových systémů a jejich deformace vzhledem k použitému materiálu. V prvním sloupci poukazuje na náboj v základním konstrukčním uspořádání. Druhý sloupec charakterizuje zásah munice do náhradního materiálu (konkr. želatinový blok/glycerínové mýdlo), v třetím sloupci vidíme střelu vyjmutou z balistické ochranné pomůcky po její kompletní deformaci [experimentální data]

Legenda: první řada: Luger 9 mm FMJ; druhá řada: Magnum .357 GOLD DOT; třetí řada .44 Rem Magnum

3.2 Souhrn

Všechny dnes používané náboje prošly svým vývojem a používají se v řadě zemí světa v různých variantách provedení obvyklých pro vojenský náboj.

Vývoj v posledních letech je poznamenán použitím nových materiálů a moderních technologií, které umožnily vznik nových konstrukcí (především střel) pro zajištění jejich vysokého účinku v cíli. Tyto náboje svými konstrukčními a balistickými hodnotami několikanásobně převyšují limitní hodnoty energií nutné k vyřazení nekryté živé síly z běžné činnosti (Juříček, 2000).

Vojenská a speciální munice je určena především k tomu, aby poškodila lidské zdraví. Na tomto faktu nemohou změnit nic ani snahy o právní regulaci jejího použití. Mezinárodní aktivity orientované na humanizaci ozbrojeného boje však mohou přispět k omezení nebo vyřazení těch druhů munice, jejichž bojové použití je nad rámec válečné účelnosti.

Novodobá filozofie protipěchotní munice vychází z následujících hledisek:

- munice musí vyřadit z bojové činnosti maximální množství cílů při minimální spotřebě
- vyřazení cíle typu živá síla by však mělo být dočasné, bez trvalých následků pro další život postižených
- letální účinky munice nejsou ve většině případů nezbytné
- munice by neměla mít specifický účinek, tj. nesmí ohrožovat civilní sektor jak v období válečného konfliktu, tak i po jeho ukončení

4 BALISTICKÉ TRAUMA, PRINCIPY ZRAŇOVANÍ TKÁNĚ

4.1 Mechanismus střelného poranění

Střela při zásahu zvíře působí **komplexně**, její vysoký účinek - ranivost je určen dynamickými vlastnostmi v okamžiku zásahu, které se mohou projevit různě. **Naše studie má za cíl zpřesnit popis chování střely v lidském organismu.**

Lidské tělo představuje z hlediska ranivé balistiky značně nehomogenní cíl. Je tvořeno prostředími o různých hustotách a s odlišnými fyzikálními a biologickými charakteristikami (Abe et al., 1996).

Jednotlivé tkáně jsou zpravidla ostře ohraničeny a vykazují odlišné **mechanické vlastnosti** – elasticitu, viskozitu, aj. Přejídy mezi nimi jsou náhlé a vlastnosti cíle, významné z hlediska ranivosti, se proto mění skokem. Tyto skutečnosti velmi ztěžují odhad chování střely v lidském těle a tím i predikci závažnosti 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 a střeliva pak závisí, zda bude ranivý potenciál střely využit či nikoliv (Juříček, 2000).

Poranění organismu člověka střelou vystřelenou z palné zbraně je velmi **složitý patologický proces**, doprovázený lokálními i celkovými změnami v oblasti nervové, cirkulační, metabolické a humorální (Juříček, 2000 in Jelaniskij, 1953).

Mechanismus působení na živou tkáň je rozdílný u střel dopadajících na ně nízkou nebo vysokou rychlostí. U **pomalých střel**, dopadajících na cíl rychlostí nepřevyšující (podle druhu a ráže střely) $600\text{--}750\text{ ms}^{-1}$, je mechanismus vzniku poranění relativně jednoduchý. Pomalá střela zasahuje pouze ty tkáně, s nimiž přichází do bezprostředního styku.

Poranění tkání pomalou střelou je ostře ohraničeno a při chirurgickém ošetření vyžaduje jen minimální excizi (odstranění devitalizované-nekrotické tkáně). Nejsou-li přímo zasaženy velké cévy, vitálně důležité orgány nebo kosti, není obvykle poranění vážné, zvláště u střel malé a střední ráže.

4.1.1 Patofysiologie střelného poranění v konkrétních živých tkáních

vysokorychlostními střelami při lovecké stříbě se liší od nízko rychlostních a nízko energetických poranění pozorovaných např. ve forenzní medicíně. Bylo pozorováno, že **známky šoku** nastupují rychleji, rozsah poranění v místě výstřelu je mnohem rozsáhlejší než v okolí vstřelu, hemodynamické poruchy jsou závažnější, nárůst hladiny vyplavovaných katecholaminů byl pozorován rychle a déle perzistoval, změny hladin glukosy, volných mastných kyselin a insulinu byly intenzivnější než u nízkok rychlostních poranění.

Např. celopláštový projektil s vysokou rychlostí s vysokou kinetickou energií při průstřelu stehna bez kontaktu s kostí předá tkáni jenom část své kinetické energie. Naopak vysokorychlostní polopášťová střela s vysokou energií zasahující kost, stehno neprostřelí. Tato střela, díky jiné konstrukci a kontaktu s kostí, předá tkáním veškerou svoji kinetickou energii a způsobí závažnou devastaci měkkých tkání.

Největší ničivé účinky rychlých střel se projevují při **zasažení parenchymatosních tkání** (křehkých tkání jako jsou játra, ledviny, slinivka břišní atp.) a orgánů s vyšším obsahem tekutin (např. svaly, srdce, mozek, močový měchýř, žaludek nebo střeva), protože z fyzikálního hlediska má pohyb střely těmito tkáněmi a orgány charakter hydrodynamického proniku. Expanzní účinek dočasné dutiny při pronikání energeticky výrazně předimenzovaných střel může v těchto tkáních vyvolat extrémně devastující účinky. Při zasažení lebky dochází k enormnímu nárůstu tlaku a dočasná dutina poškozuje mozkovou tkáň na velkou vzdálenost. V případě extrémního nárůstu nitrolebečního tlaku, může dojít i k prasknutí lebky (účinek rázové vlny je zesilován odrazy od vnitřní stěny lebky).

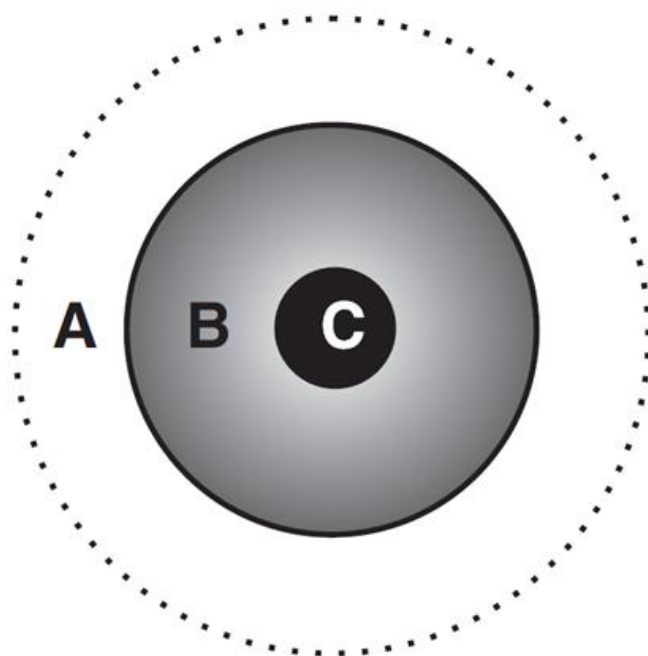
Dočasná dutina v oblasti břicha způsobuje velkou distenzi (roztahení) a náhlé snížení tlaku v břišní dutině. V důsledku toho plyn v dutých orgánech (žaludek, střeva) expanduje a může dojít k perforacím stěn těchto orgánů. Vzdálenější nervy jsou účinkem pulzací napínány a mohou dočasně ztrácet schopnost vedení nervových signálů, i když nejsou porušeny.

Při poranění nitrohručních orgánů - konkrétně plic, vyžadují vyšší hodnoty přetlaku kolem 200 kPa , při přetlaku nad 500 kPa dochází k významnému poranění plic s 50 % letalitou. Dochází k ruptuře alveokapilárních membrány, vzniká krvácení do plicního parenchymu a konsolidace plic. Závažná je vzduchová embolizace do tepen mozku a koronárních tepen, která je nejčastější příčinou úmrtí na místě exploze. Častým je vznik pneumothoraxu (Ryan, 1997). Při poranění srdce - dochází ke kontuzi provázené zpravidla závažnou arytmií.

Poranění nitrobřišních orgánů - parenchymatózní orgány jsou zraňovány vzácně, nejčastěji jde o poranění střeva, kde je popisována kontuze střevní stěny s submukózním a subserózním hemoragií, která je doprovázena kolikovitou bolestí břicha a krvácením do traktu. Ranění jsou ohroženi pozdní perforací střeva, zpravidla po více než 72 hodinách.

Na příčném řezu střelným kanálem ve svalové tkáni můžeme rozlišit 3 zóny (obrázek č. 24)

- **zónu kompletní disrupce tkání** - jde o zónu lacerované tkáně, která přišla do přímého kontaktu s projektillem nebo střepinou.
- **zóna kontuze** - jde o zónu bezprostředně přiléhající k trvalé dutině, jedná se o neostře ohraničenou oblast pokrvácených vitálních a nevitálních svalových skupin
- **zónu otřesu** - nejperifernější oblast, kde nejsou patrné makroskopicky patrné změny, jde o zónu molekulárního otřesu, v níž se mohou v důsledku nesprávného nebo opožděného ošetření rozvinout druhotné nekrózy (Klein & Ferko, 2004)



Obr. 3 Zóna poranění tkáně na příčném řezu střelným kanálem

Legenda: (A) - zóna otřesu a deformace tkáně, (B) - zóna kontuze, (C) - permanentní kavita
(Klein & Ferko, 2004)

Nejvíce devastované jsou tkáně, tvořící stěny ranného kanálu a s rostoucí vzdáleností v radiálním směru se stupeň poškození tkání snižuje. Podle stupně patologických změn se v poškozených tkáních rozlišují dvě oblasti, které jsou patrné z obrázku výše.

- **oblast bezprostřední traumatické nekrózy** - označovaná rovněž jako oblast spojitého poškození, popř. trvalého poškození tkáně
- **oblast molekulárního otřesu** - nebo také oblast nespojitého narušení, popř. dočasného poškození tkáně.

V **oblasti bezprostřední traumatické nekrózy** ztrácejí tkáně do různé hloubky nervovou, cévní a fyzikální souvislost s organismem a podléhají nekrotickým změnám (odumírání) v důsledku **ischemie** (nedokrvenosti vlivem zastavení přívodu okysličené krve). Pro tuto oblast jsou charakteristické nejen nekrózy, ale i cévní trombózy (ucpání cév krevními sraženinami), infarkty, hematomy (krevní výrony), přítomnost cizích těles a mikroorganismů. Rozsah této oblasti je dán biologickou odolností tkání, zejména jejich citlivostí na nedostatek kyslíku. Nekrotické tkáně, které se zde nacházejí, musí být chirurgicky odstraněny.

V oblasti **molekulárního otřesu** se vyskytují drobné výrony, ucpání kapilár a drobných cév krevními sraženinami, poškození nervových zakončení a traumatický otok. Pro tkáně této oblasti je charakteristická snížená odolnost vůči infekci. Po určité době se tkáně rychle hojí a dochází k obnově biologických funkcí těchto tkání.

Mezi oběma oblastmi není ostrá hranice a za nepříznivých místních i celkových podmínek se mohou v zóně molekulárního otřesu rozvinout nevratné změny ve formě **druhotné nekrózy**, která je příčinou prodlouženého hojení rány a může vést k nutnosti provedení druhotného chirurgického zákroku.

4.2 Poranění vzniklá rázovou vlnou - **BLAST syndrom**

Detonace, jejíž podstatou je přeměna chemické energie, vede k rychlému uvolnění plynu o vysokém tlaku a teplotě, který před sebou tlačí okolní atmosférický vzduch, čímž vzniká rázová vlna.

Tato detonace vede k rozvoji rychle se rozvíjející oblasti vysokého tlaku, který se propaguje z epicentra impactu. Např. při poranění dýchacích cest je přímým důsledkem na těle komplexní a dynamické interakce tlakové vlny, hrudní stěny, plicní tkáně a nervově-cévním řečištěm. Mechanismus poškození tkáně na **nahromadění tlakové vlny** a následná **destrukce tkání** na rozhraní vzduch-voda, dále pak kompresi a násilnou expanzi a re-expanzi tkání naplněných vzduchem a neposlední řadě zrychlení a deceleraci tkání o různých hustotách (Sasser, 2006).

5 ANALÝZA VĚDECKÉHO POZNÁNÍ A EXPERIMENTÁLNÍ METODY ZKOUMÁNÍ ÚČINKŮ STŘEL V DANÉ OBLASTI

5.1 ANALÝZA VĚDECKÉHO POZNÁNÍ

Současný stav vědeckého poznání v oblasti ranivé balistiky střel malých ráží je charakterizován správným pochopením mechanických základů vzniku střelného poranění, ale existuje řada nejasností v chápání biologických jevů a reakcí člověka na mechanické trauma (Juříček, 2000).

Základním metodologickým přístupem k hodnocení ranivého účinku malorážového střeliva na živý organismus v praxi je simulace působení střel na vitální tkáň. Vědecké skupiny získávaly na počátku podklady po celém světě z experimentů a v obdobích válečných konfliktů (koloniální a světové války), ze skutečných střelných poranění. Dnes, kromě válečných poranění vystupují do popředí střelná poranění pocházející z násilné trestné činnosti, sebevražd a nehod, způsobených malorážovými palnými zbraněmi (Juříček, 2017).

Mezinárodní spolupráce a výměna zkušeností probíhá na úrovni mezinárodních sympózií a seminářů za účasti diplomatů, zástupců mezinárodních organizací, právníků a expertů na balistiku zranění. 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. Vzájemné ovlivňování obou je nesporné (Juříček, 2000).

Experimentální zkoumání ranivých účinků střel je v současnosti realizováno zejména na modelových systémech, vyrobených z náhradních materiálů (balistická želatina, mýdlo, plastelína, směs petrolátu a parafínu apod.) (Cronin & Falzon, 2010). Pro svou jednoduchost a v mnoha případech dostatečnou přesnost se osvědčily metody měření hloubek vniknutí střely do různých pevných materiálů, ale také nejrůznějších plastických médií, která se svými fyzikálními a balistickými vlastnostmi blíží vlastnostem biologických tkání (Fung 1993; Moy et al., 2010; Liu, 2015; Liu Susu 2016).

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. Výzkumy (Farjo & Miclau, 1997; Cunningham et al., 2003; Kneubüehl et al., 2008), provádějící experimentální testování na živých (lidských) tkání, vyvolávají značnou **kontroverzi z etických důvodů**. Náhradním možným řešením je využití simulace pomocí **artificiálních materiálů**.

Materiál dále musí vykazovat téměř **stejnou hustotu**, jakou disponuje tělesná tkáň ($\rho = 1060 \text{ kgm}^{-3}$), ale také elasticitu, schopnost pohlcení energie střely a odpor proti jejímu pronikání.

S rozvojem výpočetní techniky je v poslední době zaznamenán značný rozvoj programů, vycházejících z identifikace a **matematického modelování** procesů souvisejících s problémy interakce tuhých soustav. Počítačová simulace procesu vnikání 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 (Juříček, 2010).

Použití vysokorychlostní kamery a transparentního náhradního materiálu umožňuje analyzovat přesný průběh mechanického přenosu vlnění, zjistit rychlost střely, analyzovat odezvu bloku na průnik střely, stanovit okamžitý tvar, rozměry a objem dočasné dutiny ve zvoleném okamžiku, dále i jejich časové změny, stejně jako balistické parametry střely (např. úbytek rychlosti střely v průběhu průniku umělého materiálu, její vstupní i výletovou rychlost, průběh deformace střely a její stabilitu při průniku).

Další použitou diagnostickou metodou je počítačová tomografie (CT) a magnetická rezonance (MRI). Tyto **zobrazovací metody** detekují nejen tvarové, ale i strukturální změny tkáně nebo náhradního materiálů (Rutty et al., 2008; Jeffery et al., 2008).

6 KRITÉRIA ZASTAVUJÍCÍHO ÚČINKU PISTOLOVÝCH A REVOLVEROVÝCH STŘEL

6.1 Efektivnost versus efekt

Budeme-li hovořit o tzv. "efektu" účinku střely, musíme začít tím, že definujeme podmínky experimentu. Konkrétně mluvíme o účinku střely - tímto je myšlena reakce, kterou střela vyvolá v živém organismu při jejím dopadu. Již v minulých kapitolách uvádíme, konkrétní účinky střely v závislosti na širokém spektru **dílčích faktorů** (fyzikální nebo konstrukční charakteristiky střely, hmotnost, rychlost, energie a deformovatelnost materiálu).

Nicméně nemůžeme popřít, že fyzikální a konstrukční charakteristiky, mohou mít rozhodující vliv na její účinek. Pokud vezmeme v úvahu pouze tyto izolované charakteristiky, můžeme stanovit tzv. potenciální účinek, kterým se nazývá - "efektivnost střely".

Efektivnost a efekt jsou samozřejmě mezi sebou navzájem související. Zasáhne-li vysoce efektivní střela určitou část těla, bude mít pravděpodobně i významný efekt. Naopak, méně účinná střela bude mít pravděpodobně menší vliv.

6.1.1 Shrnutí mezinárodně užívaných kritérií

K teoretickému zhodnocení můžeme jednotlivá kritéria účinnosti rozdělit do tří kategorií.

- Kritéria založená na hybnosti střely
- Kritéria založená na energii střely
- Kritéria založená na statistice a empirických zkušenostech

Kritéria založená na hybnosti střely - mezi které řadíme Hatcherův "*Relative Stopping Power*" a Taylorův "*Knockout Value*". Tyto kritéria vycházejí ze základního principu, které zaznamenává, že hybnost střely má velmi málo společného s možnou efektivností na živé síle. To vede k názoru, že není možné aplikovat kritéria založená na hybnosti střely k hodnocení jejich průniku do těla (Juříček, 2010).

Kritéria založená na energii střely - zahrnující Hatcherovo kritérium "*Stopping Power*" dále pak Matunasovo "*Power Index Rating*" a měřítka efektivnosti střely zastupující *Weigel* (W_H) a *Sellier* (W_{TH}). Všechna tato "energetická" kritéria zahrnují dopadovou energii střely a tím i maximální energii, kterou je střela schopna přenést na živou sílu. Efektivnost střely však nezávisí pouze na celkové energii, ale na energii, kterou je schopna přenést do tkáně.

Každý ze zmiňovaných vzorců proto vyžaduje další proměnné, díky kterým, dokážeme přizpůsobit chování střely v tkáni. V případech StP a PIR jsou to koeficienty dosazené hlavními autory, kteří přirozeně zahrnují vysoký stupeň subjektivity (např. výhodné pro větší měřidla). W_H využívá vzorce s použitím alternativního materiálu (jedlového dřeva), zatímco W_{TH} využívá teoretické úvahy týkající se přenosu energie po zavedení tzv. *hustotou průřezu* (s ohledem na deformaci).

Statistická kritéria využívají metody hodnocení střel při velkém počtu opakování. Jednotlivé výsledky jsou získány přímo z reálných případů "z ulice" nebo při použití alternativních materiálů (želatina). Některá kritéria berou v úvahu prvky efektu v cíli a jsou nezávislé na parametrizaci náboje, jiné zohledňují místo impaktu, velikost střelného kanálu ale i fyzický nebo duševní stav oběti (Juříček, 2017).

6.2 Experimentální kritéria

Pro ilustrativnější interpretaci výsledků jsme navrhli vlastní kritéria pro **WE** (ranivý účinek z angl. "Wounding Effect") a **PA** (penetrační schopnost z angl. "Penetration Ability") a kritérium pro kvantifikaci ranivého potenciálu, který se nazývá potenciál střely **WP** (angl. "Wounding Potential").

Výsledné hodnoty vycházejí z jednotlivých hledisek:

- Z balistické želatiny zaznamenáváme rychlosti, proto jsme schopni znát energetické bilance
- Glycerínové mýdlo kvantifikuje geometrii, proto vypočítáváme objemy trvalých kaveren
- Velikost destrukce materiálu, která je vytvořená konkrétní municí
- Míra schopnosti penetrace materiálu na základě dílčích destrukcí v materiálu a ráži střely
-

Úvodem jsme navrhli parametr, kterým hodnotíme daný potenciál střel (**WP**) a dále parametry pro hodnocení jejich **faktického účinku** a schopnosti střely projít danými materiály (**PA**). Parametry jsou koncipovány, aby měly jasnou fyzikální interpretaci ve formě plošné nebo objemové energetické hustoty a volitelně jasnou matematickou interpretaci z hlediska proměnných.

6.2.1 Shrnutí experimentálních kritérií

Při stanovení parametrů WE_1 , PA_1 a PA_2 jsme zdůraznili současný skutečný dopad střely při použití alternativních balistických materiálů. Můžeme zaznamenat, že se tyto kritéria výrazně liší od očekávaného referenčního kritéria WP. Domníváme se, že se nám podařilo jasně interpretovat možnosti pro validnější vyhodnocení efektivnosti střel.

Ze srovnání naší parametrizace s mezinárodně uznávanými kritérii je zřejmé, že je možné definovat **použitelné kvantifikátory** jak s důrazem na kinematické pohybové parametry střely, tak také zvýraznit geometrii střelných kanálů. Tyto dva přístupy, nebo jejich kombinace, mohou vést k podobným výsledkům, které závisí převážně na povaze jednotlivých kritérií, a to zejména v oblasti výzkumu. Aby bylo možné získat úplné informace, je vždy nutné **specifikovat podmínky**, které byly zohledněny při výpočtu kritérií, protože pohyb střely a jejich skutečné účinky silně závisí na prostředí, ve kterém se vyskytují.

Rádi bychom také, aby byly zvyklé na standardizaci komplexního vyhodnocování nábojů v situacích, kdy osobní balistická ochrana hraje rozhodující roli v okamžitém množství ztráty energetických nábojů na vestě a v bezprostředním rozměru jeho rozložení do materiálu za ní.

7 BALISTICKÉ OCHRANNÉ POMŮCKY

Balistická ochrana je vybavení, které chrání člověka proti účinkům střelných zbraní. Balistické ochranné vesty jsou jedním z nejzákladnějších bezpečnostních prostředků. Jsou poslední jistotou před zmrzačením či smrtelným zraněním (Peleg, 2005). Nejdůležitějšími vlastnostmi **neprůstřelného** materiálu jsou pevnost a pružnost. Vysoká pevnost zabrání průniku projektilu a nízká pružnost nedovolí kulce způsobit vážnější poranění. Dále je **balistická ochranná pomůcka** doplněna i protišokovou vrstvou, která se snaží absorbovat kinetickou energii projektilu a rozložit ji na větší plochu těla.

Balistická ochrana podle principu, na kterém je založena její funkce, může být pasivní (tvoří pouze mechanickou překážku) a aktivní, uvolňující při pronikání ničivého prvku (elementu) energii, která je využita k jeho zachycení (Juříček, 2017).

7.1 Problematika posuzování účinků střely na organismus člověka za ochranným prostředkem

Pro splnění požadavků daného standartu musí ochranný prostředek odolat postřelování malorážové střely za přesně daných podmínek. Nejenže nesmí dojít k probití ochranného prostředku, ale v mnoha standardech se objevuje navíc požadavek na minimální hloubku vtisku v podkladovém materiálu (Juříček, 2017).

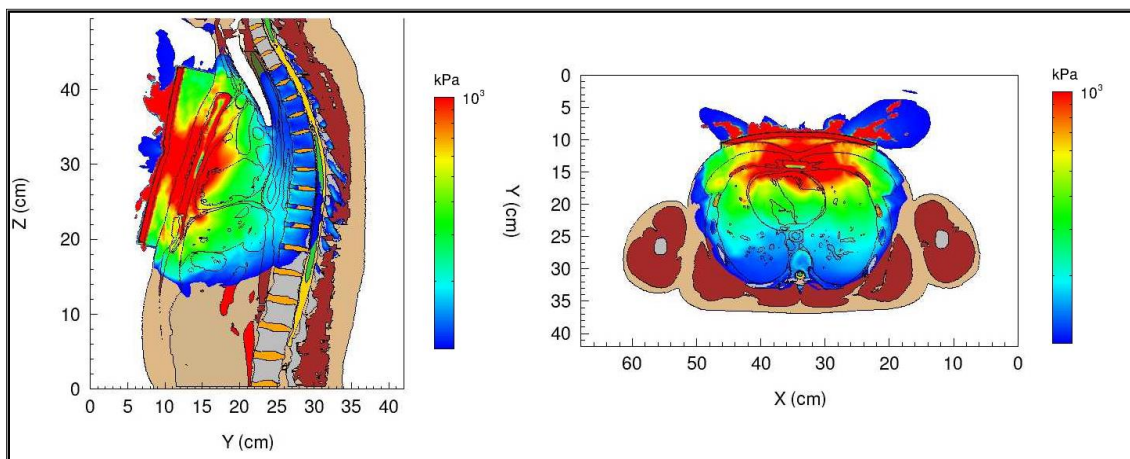
Dnešní úroveň předexperimentální numerické simulace na PC umožňuje experimentům (na pokusných zvířatech) předejít. Je však nutné, věrně popsat systém střela - balistická ochrana - organismus člověka (např. náhradní podkladový materiál) pomocí vhodného matematického vyjádření. Tento matematický model je poté třeba porovnat s experimentem.

Základním problémem při vyhodnocení vtisku v podkladovém materiálu je velikost objemu. Vyhodnocením vtisku, lze obdržet maximální hodnotu makroskopické deformace zadní plochy ochranného prostředku. Časový průběh napětí v materiálu a jeho šíření je nutné zjišťovat dalšími měřicími metodami. Rychlost šíření napětí je důležitá veličina pro vyhodnocení deformace stěny trupu a přenos napětí na vnitřní orgány a tím možnost vzniku vnitřních poranění.

Pokud je střela ochranným prostředkem zastavena, je prostřednictvím této balistické ochrany přeneseno na organismus člověka značné množství kinetické energie. Efekt této energie na lidský organismus je znám pod anglickým názvem **Behind Armour Blunt Trauma (BABT)** - přeloženo jako tupé poranění vzniklé za ochranou pomůckou. V mnoha případech může toto trauma způsobit vážné až fatální následky.

7.1.1 Modelování BAPT pomocí počítačové simulace

V současné době již lze doposud užívané balistické materiály nahradit, pomocí předexperimentální numerické simulace včetně vzniku trauma efektu při dynamickém působení zbraňového systému. Jakékoliv balistické testování na živém organismu je v rozporu s etickou komisí, proto se mnoho pracovišť snaží balistické experimenty simulovat pomocí nejrůznějších software a modelováním (M&S). Použitím modelu trupu jsou vědečtí pracovníci schopni simulovat poranění způsobené zbraňovými systémy při užití ochranné pomůcky.



Obr. 4 vlevo - maximální kompresní tlak vytvořený po impaktu nábojem 9 mm FMJ při prováděné simulaci - sagitální řez. vpravo - axiální řez (Cooper & Taylor, 2015)

Validováním modelu s dostupnými forenzními daty, budeme schopni identifikovat individuální faktory ovlivňující traumatické poškození tkání pod balistickou ochranou. Pomocí simulace a modelování, budeme schopni parametrizovat jednotlivé zbraňové systémy na konkrétní balistickou ochranu. Je nutností provádět další studie a klerovat jednotlivé působící tlaky, které způsobují poškození tkání.

Vzhledem k výrazné individuální heterogenitě a variabilitě lidského organismu, nedokážou prozatím matematické modely a simulace poskytnout konstitutivní informaci při reálném balistickém poranění. Nicméně tento způsob modelování otevírá nový koncept balistických simulací jenž by mohly být v brzké době předmětem nových optimalizačních studií.

8 POUŽITÉ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ A ZOBRAZOVACÍ METODY

8.1 Balistická laboratoř PROTOTYPA

S ohledem na rozsah plánovaných střeleckých zkoušek a jejich materiální a personální náročnost, bylo nutné ke splnění stanovených cílů využít odborné zázemí specializovaného pracoviště. Střelecký experiment byl realizován s materiální a odbornou pomocí firmy *Prototypa - ZM s.r.o., Brno*. Experimenty probíhaly na **tunelové střelnici** přizpůsobené k provádění balistických experimentů, od vedením *Ing. Martina Olšovského*. Výzkum, vývoj a výroba balistických měřicích systémů pro zkoušení nábojů do loveckých, sportovních nebo vojenských zbraní dle norem C.I.P. (*Český úřad pro zkoušení zbraní a střeliva*).



Obr. 5 Interiér balistické laboratoře Prototypa - ZM s.r.o., Brno
[experimentální data]

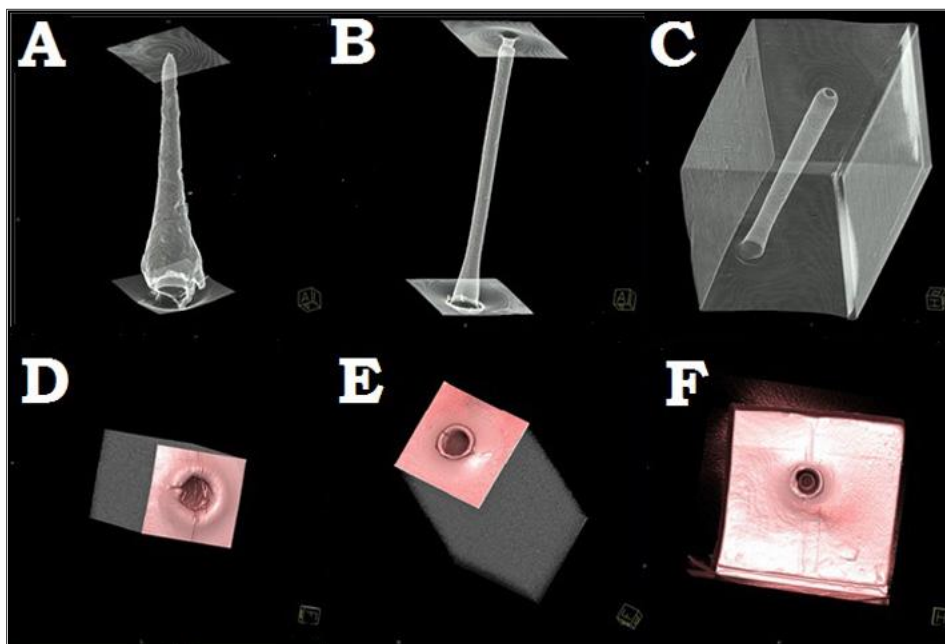
8.2 Užití počítačové tomografie (CT) v experimentu

Další použitou diagnostickou metodou je **počítačová tomografie (CT)**. Tato zobrazovací metoda je neinvazivní analytické zařízení určené k detekci nejen tvarové ale i strukturální změny tkáně nebo náhradního materiálů (Rutty et al., 2008; Jeffery et al., 2008). Za použití zado-přední a boční projekce, bylo možné vizualizovat vytvořené střelné profily v náhradních materiálech.

8.2.1 Experimentální data

Parametrizace střelného kanálu (velikost, průměr, tvar vstupního a výstupního otvoru) probíhala pomocí různých experimentálních metod (CT, mikro-CT). Dostáváme tak 3D informaci o struktuře a vlastnostech tkání (Jeffery et al., 2008; Vogl et al., 2010).

Pro vytvoření 3D modelu jsme použili experimentální data, která jsou nejčastěji dostupná ve standardním komunikačním a datovém formátu **DICOM 3.0**. Běžné rozlišení CT snímků je 512x512, počet snímků v jednotlivých řezech se pohybuje na úrovni 100 ~ 200. Přesnost snímání je na úrovni až 0,5 ~ 1 mm.



Obr. 6 3D geometrické modely trvalých dutin vytvořené v programu DICOM pomocí standardního diagnostického zařízení – CT. Vstupní a výstupní otvory v testovacích blocích pro jednotlivé typy munice, zobrazeny v 3D struktuře pomocí CT a software DICOM [experimentální data]

Legenda: **A** - zbraňový systém .357 Magnum GOLD DOT, **B** - zbraňový systém .357 Magnum, **C** - zbraňový systém LUGER FMJ, **D** - Vstupní otvor pro střelu .357 Magnum GOLD DOT, **E** – výstupní otvor .357 Magnum, **F** - vstupní otvor LUGER FMJ

8.3 Mikro počítačová tomografie (Micro-CT)

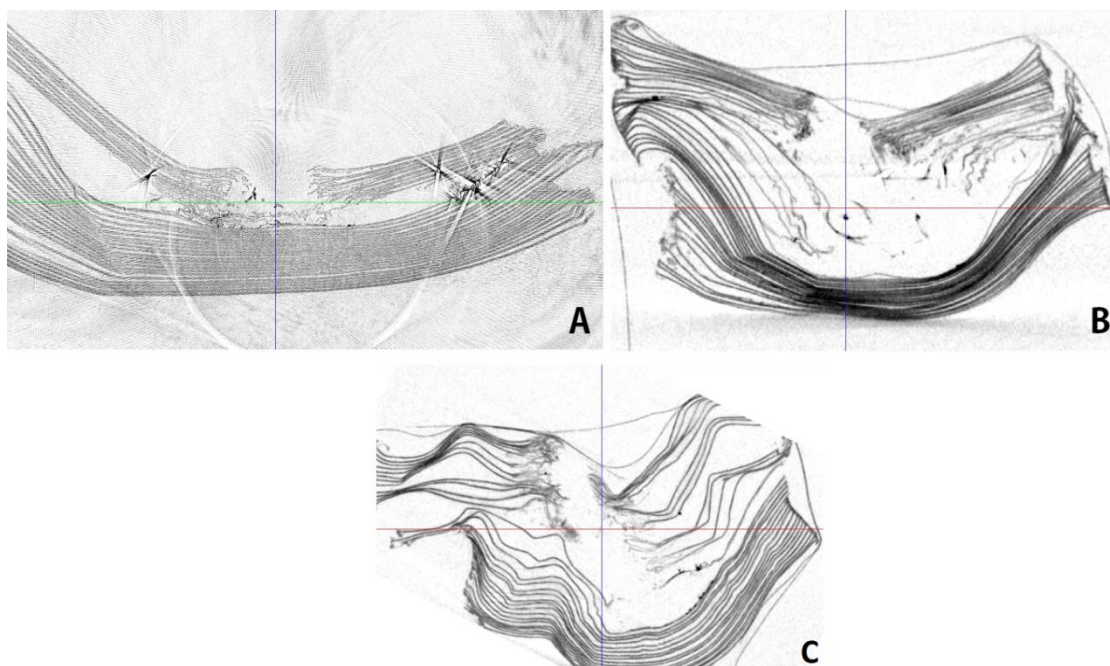
Spolu s rozlišením, které dnes dosahuje úrovně pod 1 μm se z podrobnějšího mikro-CT (*micro-computed tomography – micro-CT*) stává konkurent histologických metod schopný vizualizovat objekty buněčné a podbuněčné velikosti (Attwood, 2006).

8.3.1 Možnosti a výstupy mikro - CT

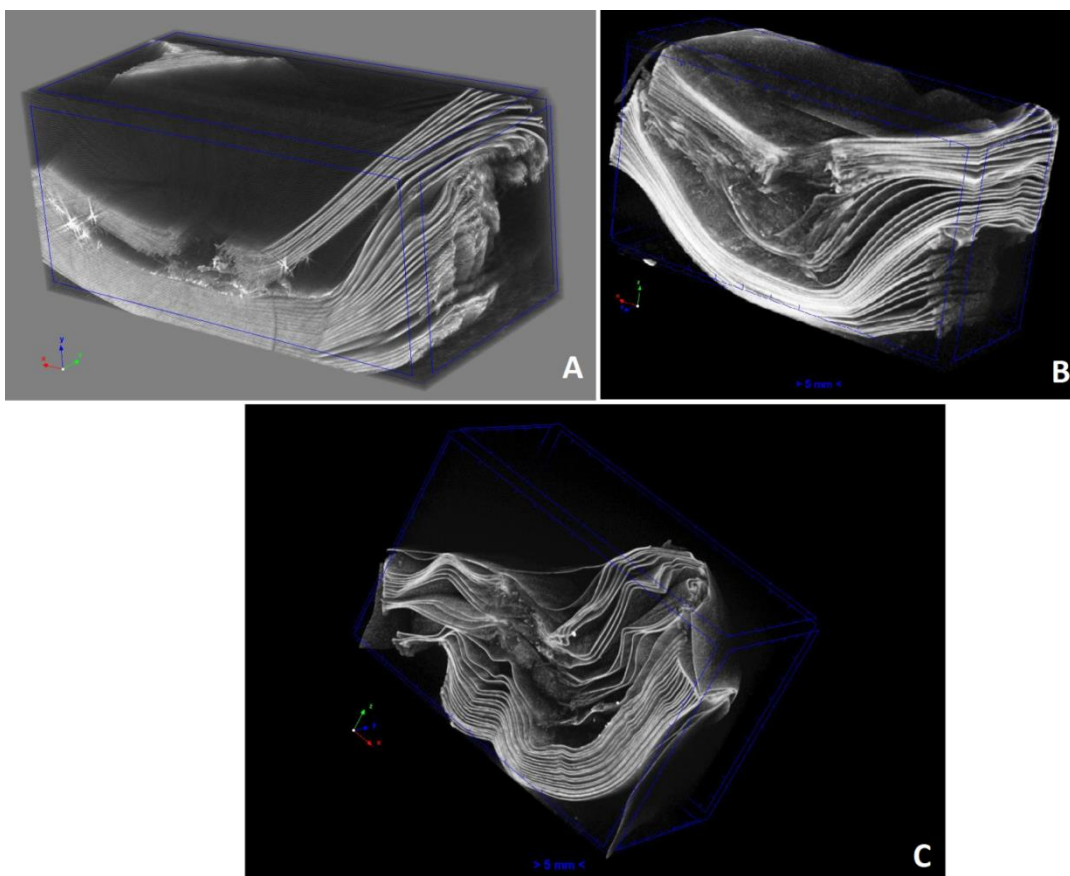
Nejlépe viditelné jsou na snímcích CT těžké struktury s atomy s vysokým protonovým číslem, které mají dostatek elektronů, s nimiž záření reaguje (Mizutani & Suzuki, 2012).

Na *obrázcích č. 7 a 8* níže lze vidět frontální řezy zkoumaných vzorku balistické ochranné pomůcky z polyethylenového vlákna **UHMWPE** a odpovídající balistické třídy odolnosti NIJ III.A složené z 30-ti vrstev. Na detailních snímcích jsme schopni parametrizovat počet porušených vrstev při průniku balistického projektilu. Dále pak pomocí měřítka, které je součástí software na vizualizaci 3D snímků - známe vstupní rozměry průniku střely, hloubu průniku do balistické vesty, konvexitu jednotlivých vrstev a při detailnějším zkoumání a použití dalších specializovaných technik jsme schopni vizualizovat i porušení jednotlivých vláken v jednotlivých vrstvách ochranné pomůcky.

Nutno poukázat na (*obrázek č. 7*) kde lze pozorovat kontaminaci vzorku střelným prachem a zbytky fragmentů střely (v *pravé části obrázku A*).



Obr. 7 Příčný řez v balistické ochranné pomůcce UHMWPE 30 vrstev - na snímku A (*Magnum .357 Gold DOT*), snímek B (*Luger 9mm FMJ*), snímek C (*reming. .44 Magnum*) [experimentální data]



Obr. 8 3D rekonstrukce balistické ochranném pomůcky UHMWPE 30 vrstev po zásahu, jednotlivými typy použité munice. A - Magnum .357 Gold DOT; B (Luger 9mm FMJ); C (reming. .44 Magnum) [experimentální data]

8.4 3D SCANNERY

Všeobecně jsou 3D skenery zařízení, která jsou určena pro digitalizaci různých 3D objektů. Skener při své práci shromažďuje pomocí různých technologií údaje o tvaru a vzhledu snímaného předmětu. Shromážděné informace jsou pak základem pro tvorbu digitálního trojrozměrného modelu. Výsledná data lze dále zpracovávat pro různé účely pomocí speciálního software.

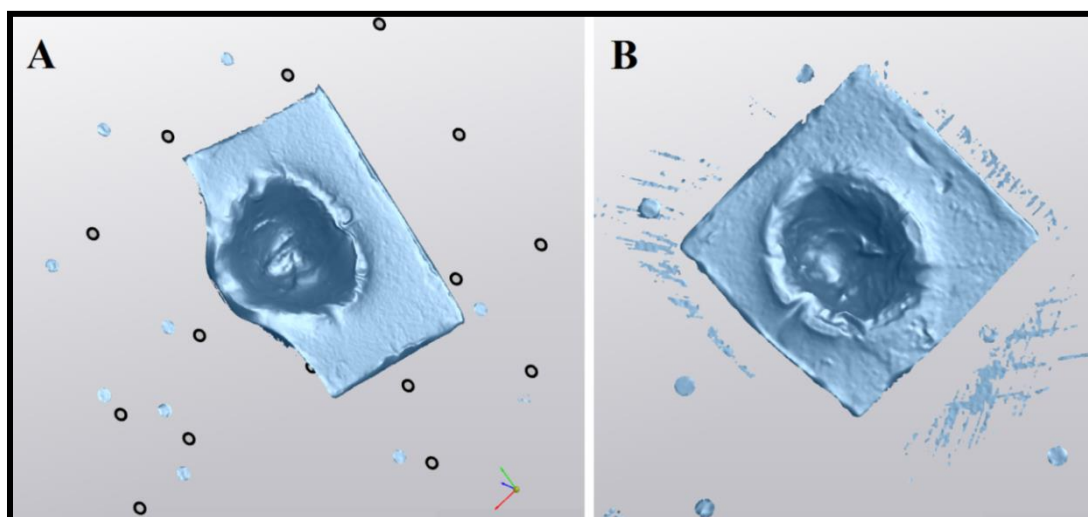
3D skenery si našly široké uplatnění ve velkém množství oborů. Jednotlivé typy 3D skenerů ve své praxi používají strojírenští technici, vědci, lékaři, tvůrci filmů a počítačových her, odborníci z oboru archeologie a muzeologie a další.

Tab. 2 Základní technické parametry HandyScan 3D 700

HandyScan 3D 700 laserový skener od společnosti CREAFORM	
Hmotnost zařízení	850 g
Rozměry	122 x 77 x 294 mm
Oblasti skenování	275 x 250 mm
Míra měřená	480.000/sec.
Světelný zdroj	7 laserových křížů + 1 extra linie
Rozlišení	0.050 mm
Přesnost	0.030 mm
Max. rozměr snímaného objektu	0.1 - 4 m
Volumetrická přesnost *	0.020 mm + 0.060 mm
Software	VX elements

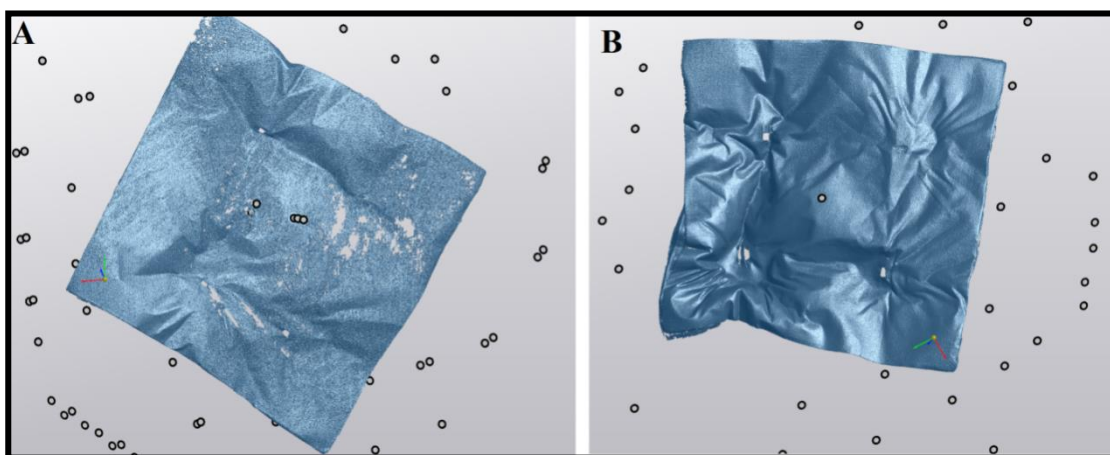
pozn: * podle standardu ISO 10360 je volumetrická přesnost definována jako hodnota závislá na velikosti

8.4.1 Software dokumentace experimentální munice



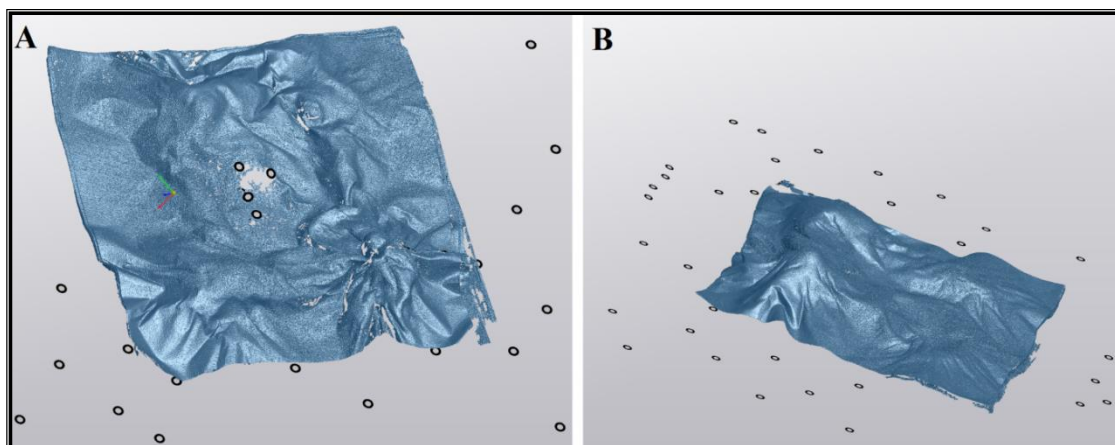
Obr. 9 Pomocí software - VX elements zpracované konkávní dutiny v glycerínovém mýdle po zásahu experimentálních střel [experimentální data]

Legenda: obr. A - střela Remington .44 s maximální průhybem 72mm **obr. B** - střela Tokarev 9 mm s maximálním průhybem 54 mm



Obr. 10 *Parametrický 3D model zpracovaný za pomoci software - VX elements zobrazující konkávní průhyby v balistické ochranné pomůcce - UHMWPE 30 vrstev [experimentální data]*

Legenda: obr. A - střela Magnum .357 GOLD DOT.; obr. B - střela Remington .44



Obr. 11 *Parametrický 3D model zpracovaný za pomoci software - VX elements zobrazující konvexní průhyby v balistické ochranné pomůcce - UHMWPE 30 vrstev [experimentální data]*

Legenda: obr. A - střela Magnum .357 GOLD DOT.; obr. B - střela Remington .44

8.5 ELASTOGRAFIE

Elastografie je neinvazivní metoda, založena na diagnostickém ultrazvuku nebo magnetické rezonanci, zobrazující **elastické vlastnosti biologických tkání**. Metoda je obdobou palpačního vyšetření tkání, kdy je nahmataná tuhost ve tkáních obvykle znakem nějaké nemoci nebo zdravotní komplikace. Elastografie vychází ze skutečnosti, že různé biologické tkáně mají různou elasticitu, a že změny elastických vlastností často souvisejí s patologií nebo abnormalitami tkání. Podstatou metody je zkoumání odezvy zobrazovaných tkání na silové působení.

Ultrazvuková elastografie založená na mapování elastických vlastností tkání je proto velmi výhodnou metodou pro zobrazení struktury a patologie jednotlivých tkání. Měření elastických vlastností tkání přináší zcela novou informaci o tkáních, kterou lze s výhodou využít i pro balistické účely, kdy známe elastické hodnoty použitých náhradních materiálů.

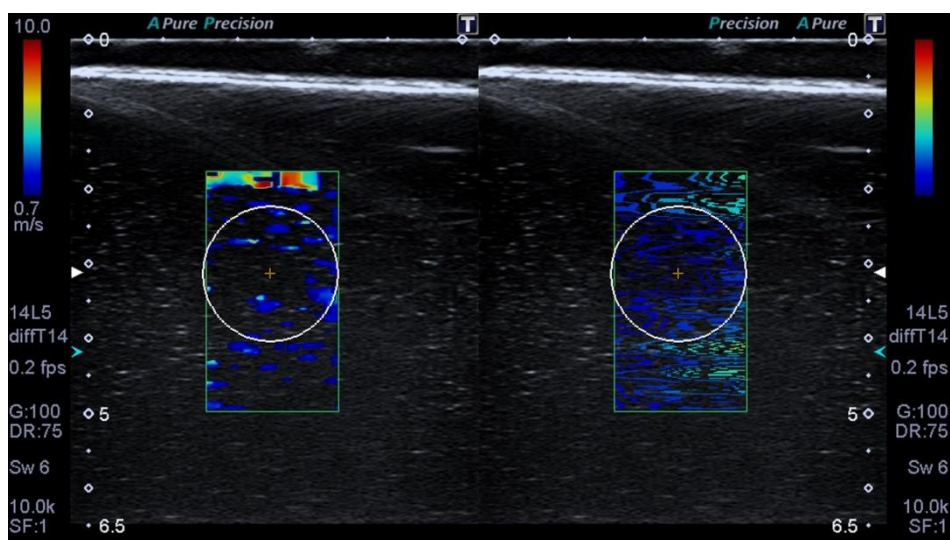
V klinické praxi je toto zařízení velmi často využíváno při **vyšetření** jater, ledvin, slinivky a dalších **parenchymatozních orgánů**. Změny elasticity mohou poskytnout důležité klinické informace při hodnocení patologicky změněných orgánů a díky tomu jsme schopni předejít traumatickému poškození při zásahu střely do balistické ochranné pomůcky (Sedlár et al., 2013)

8.6 Vlastní experimentální data

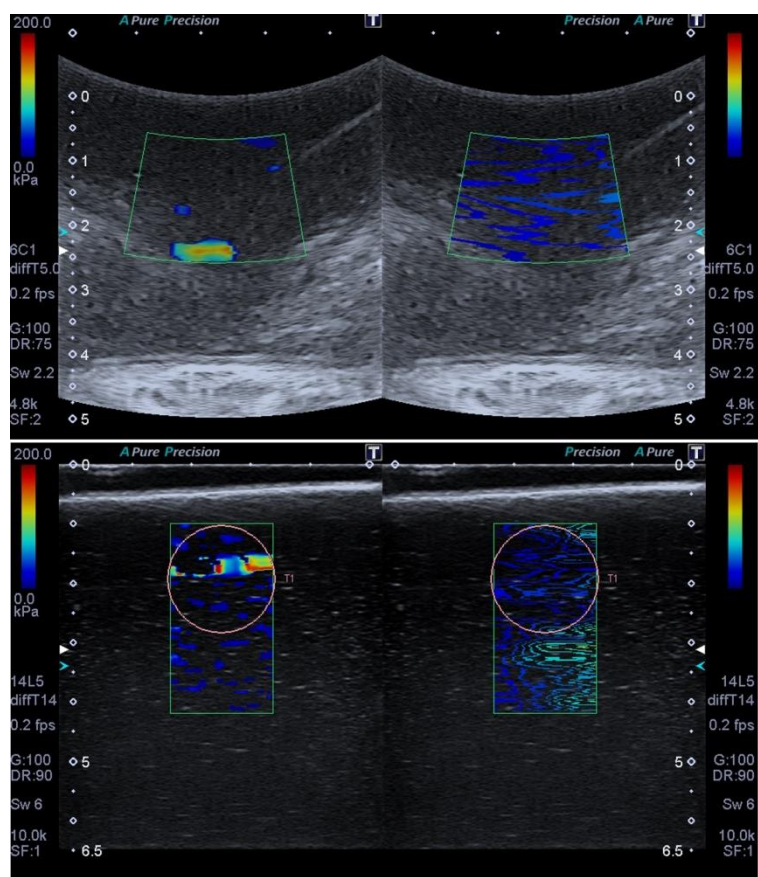
Experiment proběhl za spolupráce radiologického oddělení FN Motol Praha. Moderní experimentální metody používané v ranivé balistice jsou založeny na využití zkušebních "terčů" vyrobených z plastických resp. pružně plastických náhradních materiálů (Juříček, 2017). Materiál dále musí vykazovat téměř stejnou hustotu, jakou disponuje tělesná tkáň ($\rho = 1060 \text{ kgm}^{-3}$), ale také elasticitu, schopnost pohlcení energie střely a odpor proti jejímu pronikání.

Pomocí neinvazivní metody - ultrazvuková elastografie jsme schopni zobrazit elastické vlastnosti biologických tkání. Podstatou metody je zkoumání odezvy zobrazovaných tkání na silové působení. Na základě fyzikálních a mechanických vlastností $\rho = 1030 - 1060 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ u balistické želatiny (10 - 20 %) a $\rho = 1080 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ u glycerínového mýdla, dále pak min. rozdílným hodnotám - stlačitelnosti (κ) a dynamické viskozity (η) se tyto materiály ukázaly jako nejvhodnější k simulaci měkkých tkání v balistickém experimentu.

Níže přikládám experimentální data z vlastního měření.



Obr. 12 Ultrazvuková elastografie - 10 % balistická želatina. Rychlost šíření zvukové vlny v náhradním materiálu při kompresi [experimentální data]



Obr. 13 Ultrazvuková elastografie - 10 % balistická želatina. Velikost odporu náhradního materiálu při komprimaci vzorku sondou [experimentální data]

9 PARAMETRIZACE VZNIKLÉ KAVERNY V NÁHRADNÍCH MATERIÁLECH PŘI POUŽITÍ EXPERIMENTÁLNÍ MUNICE

9.1 Úvod

Příprava experimentů byla zaměřena na **metodiku a hodnocení** použitých experimentálních **náhradních materiálů** k provedení balistické simulace ranivých účinků použitých střel na živou sílu s využitím fyzikálního modelu.

Ke zkoumání procesu pronikání experimentální střely biologickými tkáněmi a vlivu fyzikálních a mechanických vlastností pronikáných tkání na její deformační chování, slouží střelecké zkoušky prováděné v rámci balistického experimentu. Biologický objekt (živá tkáň) je nahrazen **fyzikálním modelem** reprezentovaným homogenními bloky z náhradního materiálu, který se svými vlastnostmi téměř odpovídá skutečné tkáni (viz. tabulky č. 3 a 4).

Balistická simulace probíhala za podmínek - průnik zkoumané střely pouze měkkými homogenními strukturami, zastoupenými fyzikálními modely, jejímž výsledkem je vznik jednoduchého nekomplikovaného střelného poranění.

9.2 Cíl experimentu

Vedle základního cíle, kterým je ověření funkčnosti homogenního fyzikálního modelu, vhodnosti použité soustavy měření dopadové rychlosti střel, reprodukovatelnosti dosažených účinků a jejich archivace podle navrženého postupu, byly stanoveny tyto dílčí cíle:

- posoudit chování použitého cílového média, zejména z hlediska jeho schopnosti pohlcovat kinetickou energii pronikající střely
- prokázat souvislost velikosti a tvaru dosaženého střelného kanálu a množství předané kinetické energie ($E_{př}$) postřelovanému médiu
- vyhodnocením dosažených profilů střelných poranění střelami posuzovaných nábojů, predikovat účinek na měkké biologické tkáně člověka
-

K balistickému experimentu jsme použili zbraňové systémy ráže 9 mm (9 mm Luger FMJ .357 Magnum FMJ). Výjimku tvořil pouze zbraňový systém ráže 9 mm (.357 Magnum GOLD DOT), který patří mezi moderní náboje s výkonnou expanzivní střelou působící se zvýšeným účinkem. Náboj byl v rámci provedeného experimentu porovnáván s nábojem 9 mm Luger, který ze skupiny nábojů pro krátké kulové zbraně patří k nejrozšířenějším se střelou celoplášťové konstrukce. Tyto střely s nízkou dopadovou rychlostí zasahují in vivo pouze ty tkáně, s nimiž přichází do bezprostředního styku (Komenda et al., 2013).

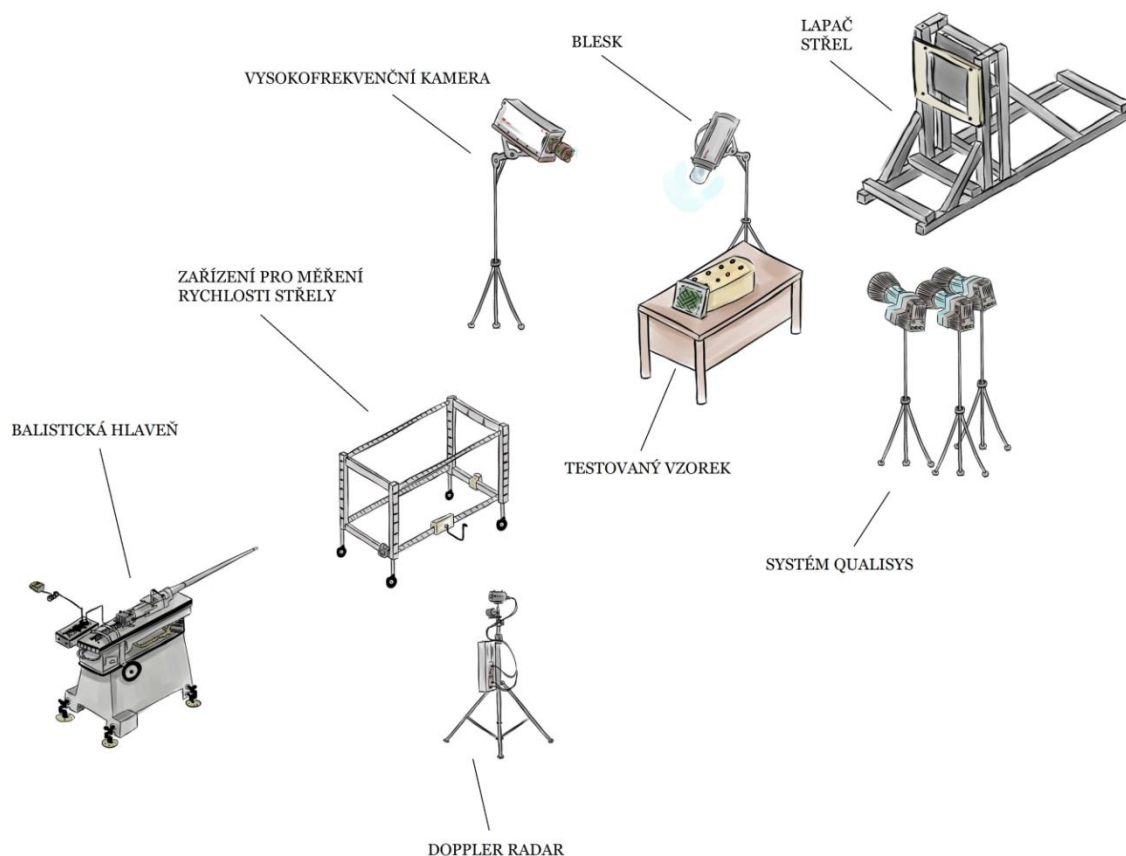
9.3 Balistická charakteristika experimentu

Zkušební balistický blok (BŽ 10 %, GM) byl na střelnici uložen na stůl a fixován proti pohybu při pronikání střely ve vzdálenosti 4,5 m od ústí balistické hlavně. Bod dopadu střely byl volen v jejím středu přední plochy bloku, aby bylo při tvorbě střelného kanálu (dočasné dutiny) zamezeno vzájemnému ovlivňování sousedících střelných kanálů a vzniku nepravidelností při jejich tvorbě (vyboulení stěny bloku).

Především u biogiválních a ogiválních střel, zakončených špičkou, nejsou žádnou vzácností i výrazná stranová (příčná) vyboření střel při jejich pronikání (Juříček, 2013). Bloky v našem experimentu byly o rozměrech 20 x 20 x 35cm. Hmotnost jednotlivých balistických kvádrů dosahovala v průměru 13 kg.

Cílem experimentu bylo **zachytit střelný kanál** u testované pronikající střely. Při každém výstřelu byla měřena pomocí nekontaktního optického hradla a Doppler radaru rychlost střely, kterou lze považovat vzhledem k poloze vzorku za rychlost dopadovou. Systém Qualisys byl z experimentu použit, ale konečná data nebyla hodnotitelná, pro velmi obtížné a optikou velmi obtížně identifikovatelné infračervené markery, umístěny na povrchu každého balistického bloku. Za balistickým blokem byl dále umístěn tzv. lapač střel, jenž sloužil k zachycení projektilu, došlo-li k přímému průstřelu balistického bloku.

Uspořádání měřicího stanoviště je patrné (*obrázek č. 14*). Náboje byly vystřelovány na připravené bloky náhradní tkáně ze zkušebních balistických hlavních po předchozím optickém zaměření osy hlavně na záměrný bod bloku. Do každého byl vystřelen pouze jeden konkrétní náboj a následně použitím vysokorychlostní kamery a transparentního náhradního materiálu jsme byli schopni **analyzovat přesný průběh mechanického přenosu vlnění**, zjistit rychlost střely, analyzovat odezvu bloku na průnik střely, stanovit okamžitý tvar, rozměry a objem dočasné dutiny ve zvoleném okamžiku, dále i jejich časové změny, stejně jako balistické parametry střely (např. úbytek rychlosti střely v průběhu průniku umělého materiálu, její vstupní i výletovou rychlost, průběh deformace střely a její stabilitu při průniku). Všechny použité zařízení byly komplexně propojeny pomocí PTU-1 (*Programmable Trigger Unit*), díky které jsme dosáhli synchronizace při opuštění střely balistické hlavně.



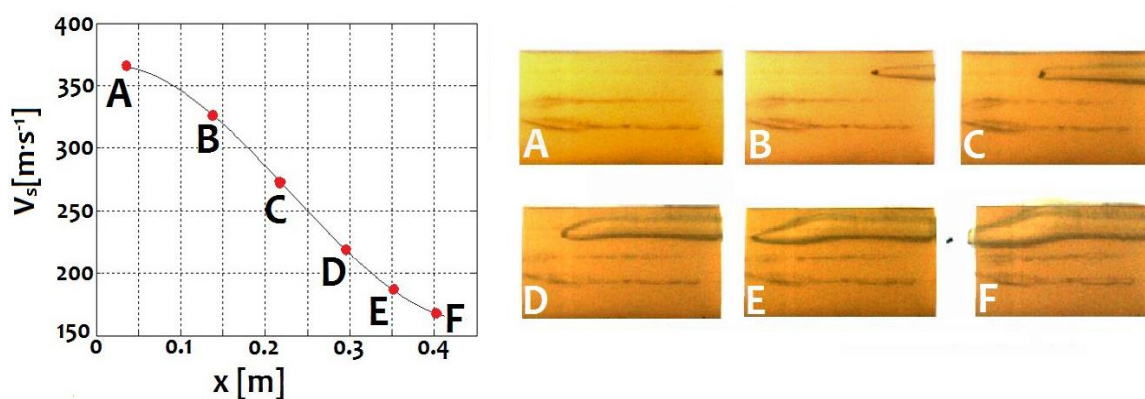
Obr. 14 *Schematické rozvržení experimentu [experimentální data]*

9.4 Dílčí výsledky

Průstřel náhradním materiálem umožňuje určit geometrii střelného kanálu. Dále i dopadovou, výletovou rychlost a hodnotu kinetické energie střely předané balistickému bloku. Níže uvádíme experimentální charakteristiky jednotlivých typů střel a průstřelů. Na *obrázcích č. 15, 16 a 17* je patrný úbytek rychlosti v závislosti hloubky průniku jednotlivých typů střel, dále tvar a velikost střelného kanálu. Je diferentní u střel různé konstrukce a balistických vlastností. Takto získané profily střelných kanálů dávají určitou představu o tom, jaké střelné poranění může být očekáváno od konkrétního zbraňového systému.

9.4.1 Náboj LUGER 9mm - FMJ

Na (obrázku č. 15) v jeho pravé polovině, vidíme záznam sekvence z vysokofrekvenční kamery *HG 100 RED LAKE*, který zobrazuje průnik střely artificiálním materiálem (10 % balistická želatina). Na snímcích jsou patrné stopy provedených průstřelů. Předmětem vyhodnocení v dané fázi práce byly pouze průstřely, které procházely středem použité balistické želatiny. Pouze v tomto případě lze předpokládat prostorově rovnoměrnou distribuci energie v rovinách kolmých na směr průstřelu, která je za předpokladu homogenních visko-elastických vlastností želatiny zajištěna stejnou masou materiálu kolem průstřelu. V levé polovině je grafické znázornění úbytku rychlosti (v) na dráze (s) konkrétního projektilu. Experimentální data byla získána pomocí počítačového softwaru **CURVE EXPERT DATA**. Hodnoty za touto vzdáleností již nejsou validní z důvodu opuštění náhradního materiálu, viz bod F.



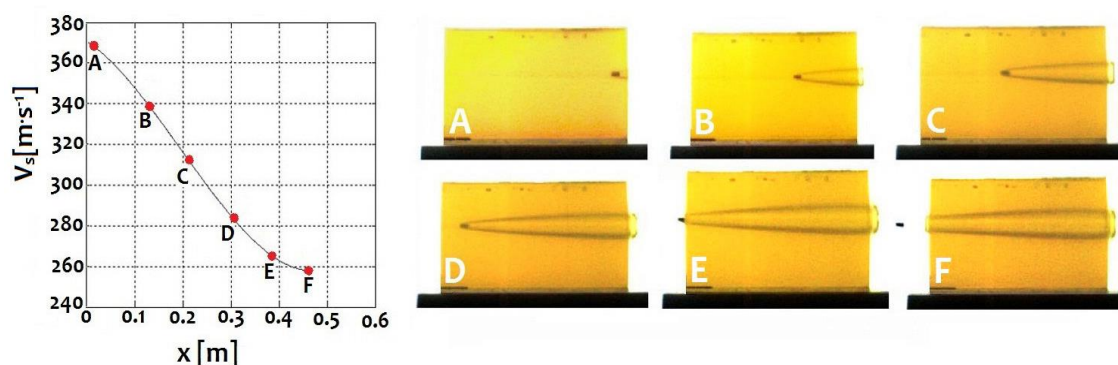
Obr. 15 Luger FMJ 9 mm - dynamika tvaru vstřelného kanálu v balistické želatině A-F (pravá polovina obrázku). V levé polovině obrázku je znázorněn průběh rychlosti v závislosti na průniku střely artificiálním materiálem [experimentální data]

Střela v průběhu svého průniku náhradním materiálem předala **75 % své kinetické energie**. Tato hodnota vypovídá do určité míry o ranivém účinku střely a charakteru poranění živého organismu. Náboj s celoplášťovou pistolovou střelou s parabolicky zaoblenou přední částí a olověným jádrem proniká blokem stabilně, v druhé polovině balistického bloku dochází k rotaci střely, rychlejšímu úbytku rychlosti a také výraznému vybočení. Střelný kanál je na svém konci zúžen. Orientace střely na konci jejího průniku je špičkou vpřed.

9.4.2 Náboj MAGNUM .357 – FMJ

Náboj .357 Magnum je charakteristický svým vysokým zastavovacím účinkem. V průběhu průniku náhradním materiálem předala **49 % své kinetické energie**. Provedený výzkum Marshall & Sanow (1992) prokázal zastavení útočníka jedním výstřelem. Tento náboj působí velký zpětný ráz zbraně a **výkon** střely se pohybuje mezi **700 – 750 J**, což je téměř 1,5 x násobek oproti předešlému případu pistolového náboje (500 J). Tato hodnota vypovídá do určité míry o ranivém účinku střely a charakteru poranění živého organismu.

Jedná se o celoplášťovou střelu s olověným jádrem (*FMJ-FP*), které je pokryto kovovým pláštěm. V důsledku své tuhé konstrukce se tato střela při dopadu na cíl nedeformuje a hladce prochází náhradním materiálem (DeMuth, 1974). Střelný kanál je stejného průměru téměř v celém balistickém bloku, pouze v koncové části je mírně rozšířen. Nedošlo k žádnému vybočení střely ze své původní osy ani k rotaci (*obrázek č. 16*). Tento náboj je hodnocen velice pozitivně z hlediska nejefektivnějšího účinku na cíl (Bresson et al., 2012).

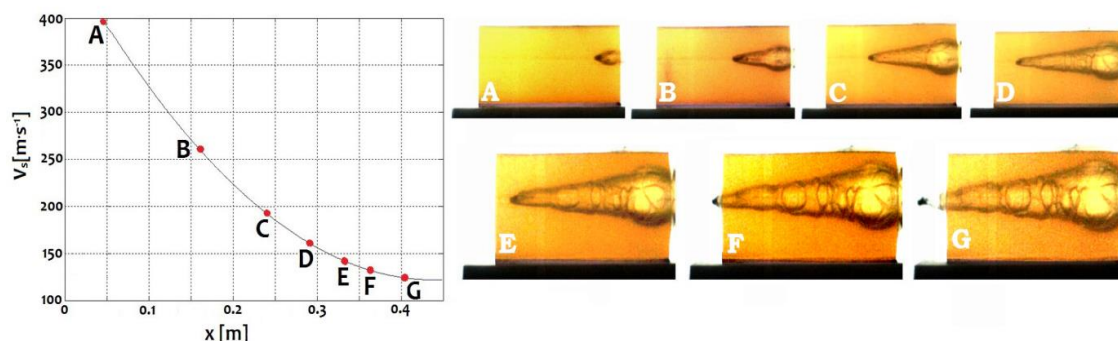


Obr. 16 Střela .357 Magnum 9mm - dynamika tvaru vstřelného kanálu v balistické želatině A-F (pravá polovina obrázku). V levé polovině obrázku je znázorněn průběh rychlosti v závislosti na průniku střely artificiálním materiálem [experimentální data]

9.4.3 Náboj MAGNUM .357 – GOLD DOT

Na (obrázku č. 17) vidíme revolverové střelivo ráže .357 Magnum GOLD-DOT s expanzivní strelou pro ruční palnou zbraň, u níž dochází při pronikání živou tkání cíle k funkční deformaci doprovázené zvětšením vnějšího průměru střely za účelem vysokého zvýšení ranivého účinku. Jde o moderní americký revolverový náboj s celoplášťovou strelou a s kuželovou přední částí a plochou špičkou, ve které je dutina kuželového tvaru. Jádrem je olovené. Střela se vyznačuje, v důsledku řízené deformace svého těla, vysokým zastavovacím účinkem při současném zachování její dostatečné průbojnosti (Rowe, 2000; Netto et al., 2008). Střela v průběhu svého průniku náhradním materiálem předala až **91 % své kinetické energie**.

Expanzivní střela revolverového náboje této ráže, vystřelená z balistické hlavně, vytvořila ve zkušebním bloku střelný kanál, který je svým tvarem a velikostí typický pro střely tohoto konstrukčního uspořádání a balistických parametrů (Juříček, 2013). Z celé experimentální munice byl odpor prostředí proti pohybu střely v průběhu jejího pronikání nejvyšší právě u této zbraně. Jsou vidět výrazné tvarové změny střelného kanálu. Kanál se vyznačuje kuželovitým tvarem se zužujícím se koncem. Dutina vznikající hned v počáteční fázi pronikání střely svou polohou a rozměry napovídá, že k úplnému dokončení řízené expanze těla střely dojde, již ve vzdálenosti asi třech ráží střely pod povrchem zkušebního bloku to odpovídá **vzdálenosti 95 mm**. Při zachování své původní hmotnosti střela dosáhla **maximální průměru dočasné dutiny až 142 mm** (tabulka č. 4).



Obr. 17 Střela .357 Magnum GOLD DOT - dynamika tvaru vstřelného kanálu v balistické želatině A-G (pravá polovina obrázku). V levé polovině obrázku je znázorněn průběh rychlosti v závislosti na průniku střely umělejšími materiálem [experimentální data]

Výstupní hodnoty jednotlivých experimentálních fází byly uspořádány do výsledných tabulek. *Tabulky č. 3 a 4* jsou uspořádány tak, aby parametrizovali použité zbraňové systémy a dokázali přehlednější formou charakterizovat dílčí výsledky.

Tab. 3 Zjištěné hodnoty pro náhradní materiál (glycerínové mýdlo) [experimentální data]

ZBRAŇOVÝ SYSTÉM	Jednotky	9mm Luger FMJ	.357 Magnum FMJ	.357 Magnum Gold DOT
Dopadová rychlost	m/s	366	375	399
Výletová rychlost	m/s	184	264	133
Ø vletového otvoru (na místě)	mm	15	28	32
Ø vletového otvoru (CT)	mm	16.9	27.2	79.1
Ø výletového otvoru (na místě)	mm	18	27	74
Ø výletového otvoru (CT)	mm	18.3	26.7	30.9
Objem vzniklé dutiny (voda)	ml	110	152	477
Objem vzniklé dutiny (CT)	ml	111.5	153.8	483.5
Max Ø dutiny (CT)	mm	32.4	27.9	81.7

Legenda: *Ø vletového/výletového otvoru (na místě)* – hodnoty získány pomocí ručního měřidla, *Ø výletového/vletového otvoru (CT)* – hodnoty získány pomocí diagnostické metody počítačové tomografie (CT)

Tabulka č. 4 uvádí jednotlivé parametry experimentální munice v náhradním materiálu (balistická želatina). Výhodou tohoto materiálu je průhlednost a bezbarvost, proto v něm můžeme zaznamenávat průběh střely pomocí vysokofrekvenční kamery. Touto metodou jsme dosáhli možnosti změření maximálního průměru dočasné dutiny pomocí vysokofrekvenční kamery. To odpovídá expanznosti střelného kanálu ihned po průletu střely. Glycerínová mýdla mají oproti želatině tu výhodu, že jsou mnohem plastičtější a po prostřelení v nich zůstává dutina, jejíž objem lze měřit přímými metodami. Nevýhoda spočívá v neprůhlednosti mýdel (Kneubüehl et al., 2008).

Tab. 4 Zjištěné hodnoty pro náhradní materiál (balistická želatina) [experimentální data]

ZBRAŇOVÝ SYSTÉM	Jednotky	9mm Luger FMJ	.357 Magnum FMJ	.357 Magnum Gold DOT
Dopadová rychlost	m/s	371	380	402
Výletová rychlost	m/s	178	268	134
Ø - maximální vstupní (vysokorychlostní kamera)	mm	34	45	99
Ø - maximální výstupní (vysokorychlostní kamera)	mm	32	21	33
Maximální Ø dočasné dutiny	mm	74	63	142
Vstupní kinetická energie střely	J	504	725	657
Výstupní kinetická energie střely	J	128	359	73
Rotace střely	--	ANO	NE	NE
Deformace střely	--	NE	NE	ANO

Tabulka č. 5 uvádí porovnání mezinárodně uznávaných kritérií podle Kneubüehl (2011) a námi zavedených experimentálních kritérií. Vedle jednotlivých parametrů, zdůrazňujeme zde i predikci zranění experimentálně zkoumanými zbraňovými systémy - od I (nejméně) do III (nejvíce).

**Tab. 5 Porovnání mezinárodně uznávaných kritérií s experimentálními
[experimentální data]**

KVALIFIKACE ZRAŇUJÍCÍHO EFEKTU							
od I (nejméně) do III (nejvíce)							
Kritéria	9 mm Luger		357 Magnum FMJ		357 Gold DOT		Author
STP	32.6	I.	46.2	II.	56.9	III.	J. S.Hatcher (1927)
RSP	27.5	I.	38.1	II.	44.3	III.	J. S.Hatcher (1935)
W _H	12.9	I.	18.2	III.	15.7	II.	W. Weigel (1975)
W _{TH}	8.4	I.	8.8	II.	9.8	III.	K. Sellier (1979)
PIR	94.1	I.	134.9	II.	159	III.	E. A.Matunas (1984)
KO	7.01	I.	9.76	III.	8.17	II.	J.Taylor (1948)
OSS	79	I.	96	III.	89	II.	E. Marshall & E. Sandow (1992)
WP	8.4	I.	12.2	III.	10.8	II.	R. Billich et al. (2016)
WE ₁	50.4	II.	47.2	I.	73.9	III.	
WE ₂	13.9	I.	19.3	II.	60.6	III.	
PA ₁	23.1	II.	49.7	III.	11.1	I.	
PA ₂	50.3	II.	70.4	III.	33.3	I.	

Legenda: **StP** – Stopping Power; **RSP** – Relative Stopping Power; **W_H** – Effectiveness Criterion (Weigel); **W_{TH}** – Effectiveness Criterion (Sellier); **PIR** – Power Index Rating; **KO** – Knockout Value; **OSS** – One Shot Stop; **WP** – Wounding Potential; **WE_{1/2}** – Wounding Efficiency; **PA_{1/2}** – Penetration Ability

9.5 Dílčí diskuze

Byly stanoveny základní parametry pro použité experimentální typy střel. Dopadovou rychlost jsme zjišťovali pomocí optických hradel pro měření rychlosti (*LS-04 Intelligent Light Gates*). Měřený projektil musí proletět oběma hradly, kolmo na jejich roviny. Získáme tak čas, který potřebuje projektil k překonání vzdálenosti mezi hradly. Výletová rychlost z umělého materiálu byla zajištěna pomocí radaru (*DRS-1 Doppler Radar System*). Metoda využívá *Dopplerova jevu*.

Dalším hodnotícím kritériem při parametrizaci byla statická velikost maximální dutiny. Za velikost maximálního průměru považujeme dva nejvzdálenější body, které vytvořila trvalá dutina měřená ve frontální rovině testovacího bloku (Fackler, 1996; Schyma & Madea, 2012). Dále byly stanoveny hodnoty maximálních objemů dočasných a trvalých dutin. Zde byly získány diferentní hodnoty z diagnostické metody CT a přímé metody vylévání vodou. V druhém případě ovšem dochází k porušení kontinuity vletového nebo výletového otvoru, tento jev způsobuje částečnou neshodu výsledků. Maximální objem dutiny byl získán pomocí segmentálních algoritmů. Trvalou dutinu je třeba odlišovat od dutiny dočasné, která vzniká při průchodu střely tkáněmi v důsledku jejich radiální pružné deformace. Pro kvantitativní vyjádření účinku střely v tomto prostředí byla vyvinuta metoda radiálních trhlin původně určená pro potřeby vojensko lékařského výzkumu. 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 v daném místě střelného kanálu (Juříček, 2017).

Došlo-li k rotaci střely po dopadu do umělého materiálu, byl zaznamenán zvýšený úbytek rychlosti na dráze, oproti střelám nerotujícím. Rovněž dochází ke zvětšení průměru vytvořené dutiny. Tento efekt může být jedním z podstatných kritérií pro ranivý účinek střely. Došlo-li k deformaci střely uvnitř náhradního materiálu, může se jednat o technickou závadu munice nebo o zakázanou tzv. expanzivní municí. Tato munice byla do experimentu zařazena z důvodu získání základních informací o jejích účincích, které jsou málo publikovány.

Plášť střely GOLD-DOT byl po zásahu do náhradního materiálu kompletně deformován, proto také měla největší ranivý účinek z použité munice. Podle diagnostické metody vytvořil tento zbraňový systém vletový otvor o **průměru větším než 48,2 mm**, oproti otvoru výletovému.

9.6 Dílčí shrnutí

Dlouhodobá praxe především zahraničních pracovišť (Jussila, 2004; Salisbury & Cronin 2008; Schyma & Madea, 2012) potvrdila, že **balistická želatina** a **glycerínové mýdlo** jsou nejvhodnějšími náhradními materiály ke studiu jevů v oblasti ranivé balistiky. V některých oblastech však každý z těchto materiálů vykazuje velmi rozdílné vlastnosti (Juříček, 2013). Z provedeného srovnání obou náhradních materiálů je patrné, že u obou jsou výhody a nevýhody přibližně v rovnováze. Proto se v balistickém experimentu využívají oba druhy, přičemž výběr použitého materiálu závisí na cíli a zaměření experimentu (Cronin, 2010). S ohledem na blízké vlastnosti umělých materiálů a živých tkání lze předpokládat, že obdobné účinky by hodnocená střela vyvolala i při průniku svalovou, tukovou, vazivovou a jinou měkkou tkání (See et al., 2009).

V okamžiku dosažení **maximální velikosti dočasné dutiny** dochází k největšímu poškození měkkých tkání, které je doprovázeno potrháním okolních svalových vláken, nervů a cév, u nichž je v důsledku rozpínání dočasné dutiny překročena mez pevnosti v tahu. Důležitý efekt je i v impaktním namáhání těchto tkání mechanickým vlněním vznikající při dopadu do biologického materiálu – živé tkáně.

Za pozoruhodné lze považovat zjištění, že některé hodnocené pistolové střely se během svého pohybu náhradním materiálem převracely a svůj pohyb ukončily v obrácené poloze (dnem vpřed) vzhledem ke svému pohybu v první fázi pronikání. V experimentu byl dále prokázán výrazný vliv vnějšího tvaru střely i jejího vnitřního uspořádání na dosaženou úroveň účinků v cíli. **Hmotnost střely** a její **dopadová rychlost** na povrch tkáně tvoří rozhodující složku ranivého potenciálu střely. **Tvar střely**, její **konstrukce** určují, kolik z tohoto potenciálu je ve skutečnosti využito k ničení tkáně a představují hlavní konstrukční charakteristiky determinující ranivý účinek střely.

Experimentálně získané profily střelných kanálů zkoumaných střel spolu s jejich rozměrovými charakteristikami slouží ke vzájemnému porovnání chování střel při jejich proniku náhradní tkání, posouzení využití jejich ranivého potenciálu a predikci ranivých účinků na měkkou biologickou tkáň (Juříček, 2013). Tyto profily střelných kanálů dávají určitou představu o tom, jaké střelné poranění může být očekáváno od konkrétního zbraňového systému. Také stopy po fragmentaci těla střely nebo množství porušené tkáně mohou být porovnány se sériemi profilů střelných poranění k odhadu typu střely, která poranění způsobila.

Lékařský přístup vychází ze zkušeností vojenských chirurgů s léčbou a ošetřováním střelných poranění. *Červeným křížem* byla vypracována jednotná klasifikace střelných poranění, která se používá ve všech nemocnicích (Coupland, 1977). Tato klasifikace umožňuje provedení prvotní charakteristiky střelného poranění a u totožných poranění umožňuje návrh chirurgické léčby a její prognózu. Výsledky těchto experimentů mají dále význam i pro konstrukci balistických ochranných systémů.

10 Měření mechanických charakteristik polymerních vláken

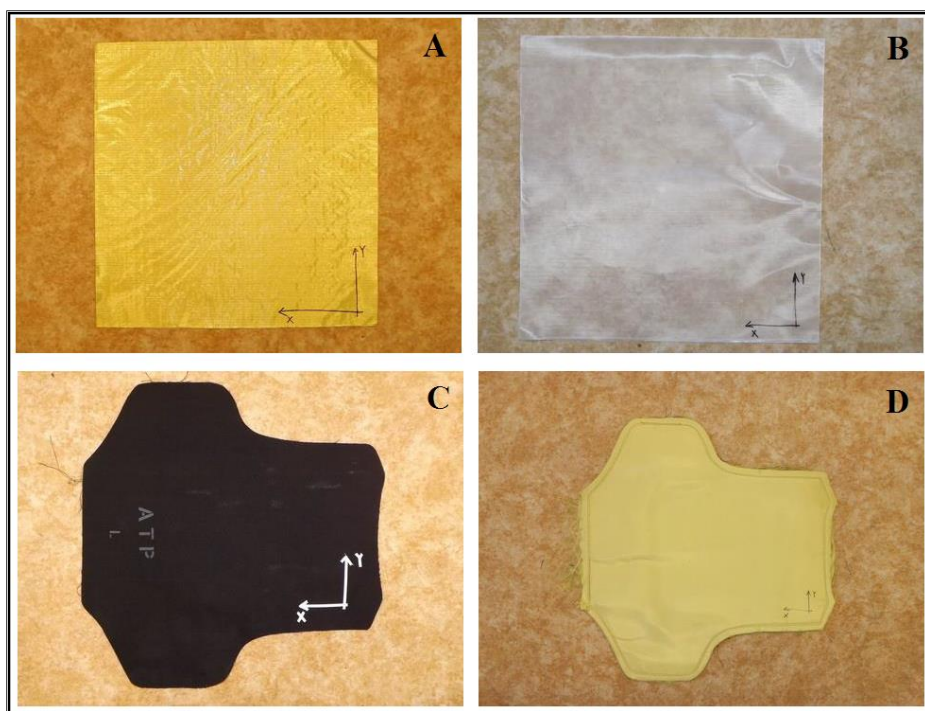
10.1 Úvodem

Vlastní experiment probíhal v Novém Technologickém výzkumném centru - Západočeské Univerzity v Plzni (NTVC - ZČUP).

Měření mechanických charakteristik polymerních vláken bylo provedeno se vzorky tkanin/folie ochranných vest a to tkaniny *typu A (žlutá)*, *typu B (bílá)*, které byly dodány samostatně. Dále o vestu tvořenou třemi vrstvami tkanin, a to *tkaninou D (žlutá)* s oboustrannou krycí vrstvou tvořenou tkaninou *C (černá)* (obrázek č. 18).

Pruhy tkaniny/fólie (dále zkušební tělesa) v daném směru (x, y) a šířce (5, 10, 15 mm) byly připraveny ostrým řezem a to tak aby na krajích nevznikaly ořepy, příp. nezbyvaly volné prameny. Kraje zkušebních těles byly přehnuty přes ocelový váleček a zalepeny epoxidovou pryskyřicí. Ocelový váleček sloužil jako zábrana proti prokluzu zkušebního tělesa mezi čelistmi trhacího stroje.

Během ustavení zkušebního tělesa byl brán ohled na rovnoběžnost tkaniny mezi upínacími čelistmi. Po každém upnutí byl mechanicky dotažen stisk čelistí a zkontrolováno nerovnoměrné předepnutí vláken příp. jejich překřížení. Metodika měření odpovídala standardní destruktivní zkoušce v tahu dle *DIN EN 527-3*.



Obr. 18 Vzorky tkanin/fólie ochranných vest [experimentální data]

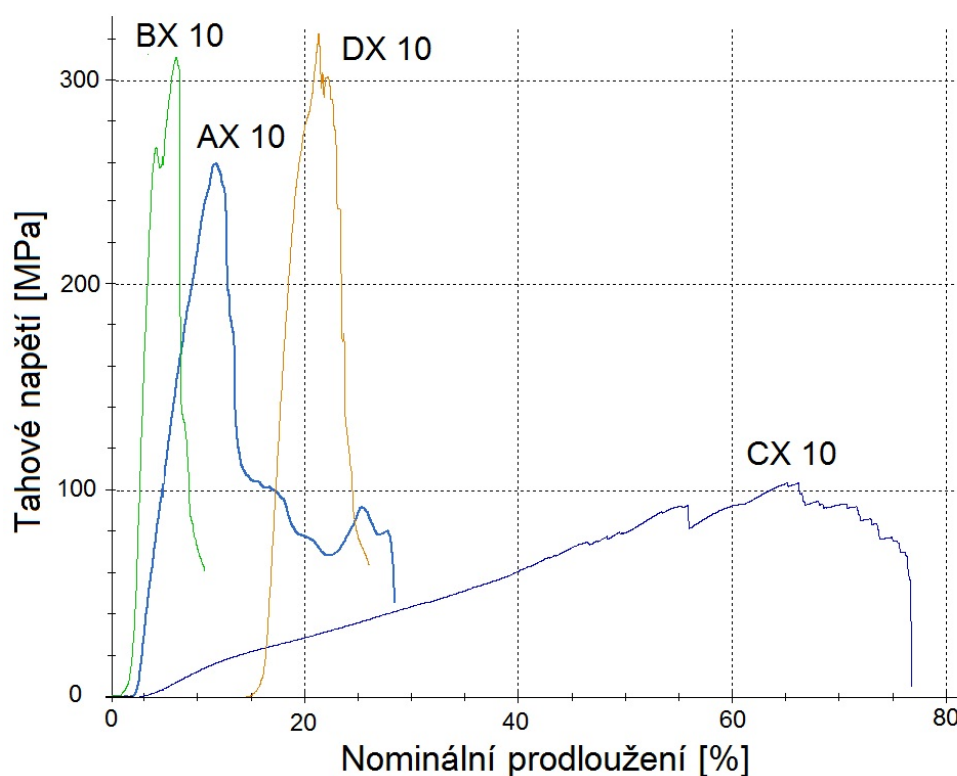
Legenda: **Obr. A** - ochranná balistická pomůcka - para-aramidové vlákno (KEVLAR). **Obr. B** - součást balistické ochrany - vysokomolekulární polyetylen (UHMWPE). **Obr. C** - součást balistické ochrany nylonové - polyamidové vlákno (antitraumatická vložka). **Obr. D** - vrstva balistické ochrany para-aramidová vlákna - (KEVLAR - Strike Face)

10.2 Zatěžování zkušebních těles a popis experimentu

Zatěžování se uskutečnilo na zkušebním stroji Zwick/Roell Z005 s maximální možnou zatěžovací silou 5 kN. Testování zkušebních těles odpovídalo zkoušce v tahu dle DIN EN 527-3 s před-zatížením 0,15 N a v režimu zatěžování 50 mm/min. Výsledky meze pevnosti v tahu (R_m [MPa]) odpovídají přetržení zkušebního tělesa (nebo poklesu napětí pod minimální mez), které vznikly v pracovní oblasti (L_c) zkušebních těles.

Výsledky zkoušek jsou zaznamenány analyticky a graficky, odpovídající měření vzorku značenému dle typu tkaniny/fólie-směru-šířky vzorku (*graf č.1*). Během zkoušek docházelo ke zvyšování síly/napětí skokovým způsobem a to pravděpodobně z důvodu vnitřní napjatosti některých svazků tkaniny/fólie. Ze zkoušky bylo patrné, že v počátcích zatěžování docházelo k prokluzu vnitřních svazků a k primárnímu zatěžování vnějších svazků.

Graf 1 Záznam zatěžování v závislosti napětí na prodloužení u vybraných zkušebních těles typu A, B, C, D o šířce 10 mm a orientaci X [experimentální data]



Legenda: **AX 10** - zkušební těleso - vrstva balistické ochrany para-aramidová vlákna (KEVLAR) o šířce 10 s orientací ve směru X. **BX 10** - zkušební těleso - vrstva balistické ochrany vysokomolekulární polyetylen UHMWPE o šířce 10 mm s orientací ve směru X. **CX 10** - zkušební těleso - nylonové - polyamidové vlákno (antitraumatická vložka) o šířce 10 mm s orientací ve směru X. **DX 10** - zkušební těleso vrstva balistické ochrany para-aramidová vlákna - (KEVLAR - Strike Face) o šířce 10 mm s orientací ve směru X.

Grafický záznam reprezentuje srovnání referenčních průběhů: AX 10, BX 10, CX 10, DX 10. Maximální napětí na ose y odpovídá mezi pevnosti v tahu zkušebního tělesa - R_m [MPa]. Osa x reprezentuje prodloužení zkušebního tělesa v průběhu zkoušky - A_{50} [%]. V některých případech docházelo ke skokové změně napětí, pravděpodobně z důvodu heterogenní napjatosti svazků/vláken ve zkušebním tělese.

Na výše uvedeném *grafu č. 1* vidíme záznam zatěžování zkušebních těles typu A, B, C, D. Kdy řízenou veličinou je deformace a sledovaná veličina je síla v jedné z čelistí. Data se následně přepočítávala na tahové napětí. Je vidět, že vzorek DX 10 je chybný a to z důvodu že napětí v čelistech nebylo dostatečné a proto hodnoty nominálního prodloužení začínají až u hodnoty 15 %. Graf nám znázorňuje různé tuhosti měřených materiálů - např. materiál C - jedná se pouze o obalový systém jednotlivých plátů vyráběný z fólie. Naopak balistické vzorky B a D měli tuhost nejvyšší.

10.3 Mikroskopie a fotodokumentace

Obrazová dokumentace struktury vláken a úpletů, pokud se jednalo o tkanou vazbu, byly pořízeny optickou i elektronovou mikroskopií. Pro účely optické mikroskopie byl využit *digitální mikroskop Hirox KH-7700*. Elektronová mikroskopie byla provedena na přístroji *FEI Quanta200* v režimu nízkého vakua pro snímání elektricky nevodivých vzorků. Vzorky pro mikroskopii byly připraveny jemným odříznutím vrstvy tkaniny, popřípadě folie s vlákny tak, aby nedošlo k narušení uspořádání vláken anebo změny orientace úpletu. Snímky jednotlivých vláken byly pořízeny na nedotčených částech vláken, uvolněných ze struktury balistických vrstev. Nejedná se tedy o snímky vláken po zkouškách mechanické pevnosti, ale o původní (nezatěžované) vrstvy vláken.

10.4 Dílčí shrnutí

Řada zkoušek měla nestandardní průběh a vývoj funkční grafické závislosti síla - prodloužení, v některých případech, znemožnil kompletní popis všech měřených veličin. Během zkoušek docházelo ke zvyšování síly/napětí skokovým způsobem a to pravděpodobně z důvodu vnitřní napjatosti některých svazků tkaniny/fólie. Na základě grafického záznamu software zkušebního stroje vyhodnotil všechna měření, nicméně tyto výsledky nabývaly extrémních nebo i záporných hodnot (např. v prodloužení) a proto byly z tabulky vyřazeny. Referenční grafické záznamy v závislosti napětí na prodloužení jsou uvedeny v *tabulce č. 6*.

Tab. 6 Výsledné mechanické charakteristiky [experimentální data]

Zkušební těleso	Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu [MPa]
AX	202.87
AY	149.84
BX	221.72
BY	330.59
CX	97.84
CY	94.51
DX	212.88
DY	323.79

Materiál vláken balistických a krycích vrstev byl dále analyzován infračervenou vibrační spektroskopií - přístrojem *Nicolet iS5* v režimu *ATR*. Ve všech případech balistických vrstev tvořených žlutými vlákny a to ať svazky, nebo úpletem (vzorek A a D) se nejpravděpodobněji jedná o para-aramidová vlákna (materiál Twaron, popřípadě Kevlar).

Ve vzorku A jsou svazky para-aramidových vláken odděleny polyetylenovými foliemi. V případě bílé balistické vrstvy (vzorek B) nelze, vzhledem ke způsobu výroby, přesně určit složení jednotlivých částí. Je pravděpodobné, že vlákna jsou tvořena vysokomolekulárním polyetylenem pojeným polyesterovou, nebo obdobnou matricí v našem případě se jednalo o vrstvu balistické ochranné pomůcky UHMWPE III.A dle NIJ. Krycí vrstva kompletní balistické vesty (vzorek C) je tvořena kompozitem úpletu nylonových (polyamidových) vláken pojených polyetylenovými vrstvami. Zde je pravděpodobné, že výroba byla provedena lisováním za tepla. Je vhodné podotknout, že vzhledem k materiálu tato krycí vrstva je schopna nést určité balistické zatížení, ale tento materiál **netvoří** hlavní část balistické ochrany.

11 Teorie rázu ve viskoelastickém kontinuu

11.1 Úvod

Cílem této práce je vypracovat zjednodušenou analýzu interakce střely s balistickou ochranou pomůckou (BOP). Řešení je prováděno za řady přijatelných zjednodušení, takže není nutno používat náročné numerické metody. Výsledkem jsou zjednodušené analytické vztahy dovolující stanovit mechanické účinky na materiál za BOP. Jde především o parametry **tlakové vlny**, tj. **velikost posunutí** a **velikost rychlosti, popř. zrychlení**, kterým jsou vystaveny tkáně v přímém kontaktu za balistickou vestou. Z jejich velikosti lze pak usuzovat při jakých **vlastnostech BOP** (tloušťka, elasticita apod.) a projektilu (rychlost, hmotnost, průměr apod.) může dojít k jejímu **ireverzibilnímu poškození**.

Mnohé poznatky v níže uváděných teoretických i experimentálních výpočtů byly získány za velmi úzké spolupráce s *prof. Ing. Františkem Maršíkem, DrSc.* z Ústavu termomechaniky AV ČR - více viz referenční seznam *Teorie rázu ve viskoelastickém kontinuu* [online]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/cs/marsik>.

11.2 Cíl experimentu

Ověřit výsledky vypracované zjednodušené analýzy interakce střely s balistickou ochranou pomůckou (BOP) a doplnit neznámé empirické parametry. Teorie je porovnávána s dobře měřitelnými parametry získané opakovanými experimenty.

Měřenými veličinami jsou:

- parametry tlakové vlny, tj. velikosti posunutí a velikost rychlosti, event. zrychlení, kterým jsou vystaveny tkáně těsně za BOP
- velikost deformace, která je důsledkem zmaření kinetické energie střely
- maxima výchylek u pozorovaných markerů (MID 1-9) z rychlosti postupu rázové vlny v NM
- charakteristická rychlost šíření vlny v NM
- celková elasticita a viskozita interagujících těles
- parametry pro stanovení maximální hloubky průhybu BOP v NM tj. deformační účinek střely
- maximální rychlosti kontaktní plochy
- velikost amplitudy kontaktní plochy a její souvislost s $\varnothing D$

Na základě naměřených parametrů (dynamických účinků projektilu) jsou vypočteny následující dynamické účinky projektilu:

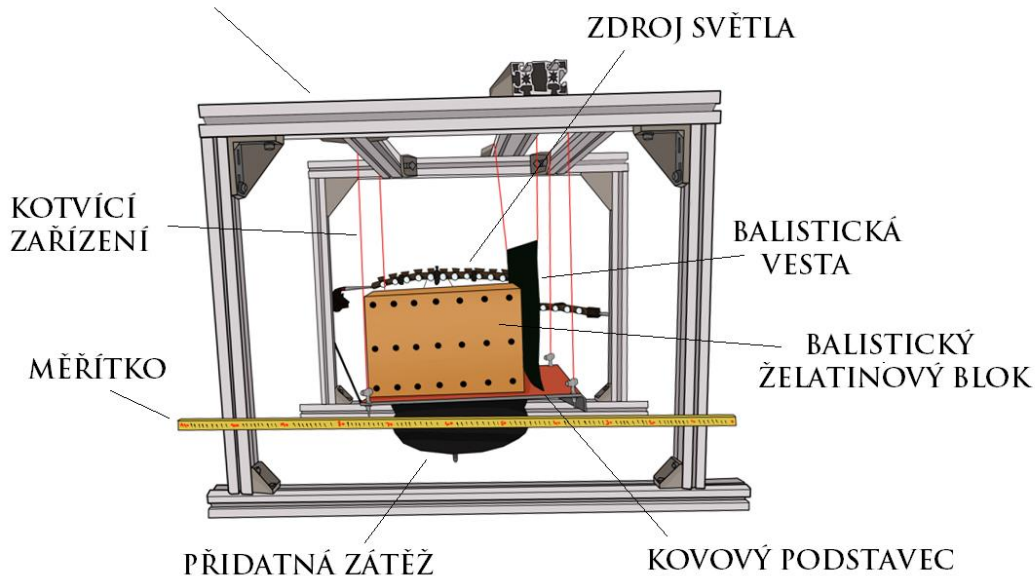
- šíření deformační vlny od místa kontaktu
- určení oblasti maximální deformace tj. vystavení tkáně největším traumatizujícím účinkům pod BOP
- vliv destrukčního účinku pod BOP na parenchymatózní orgány lidského těla

11.3 Charakteristika experimentu a jeho vyhodnocení

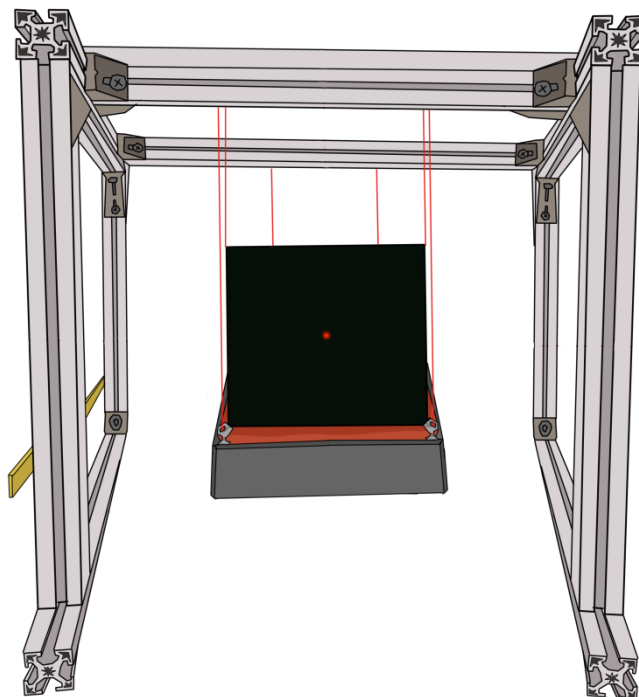
Balistické experimenty byly prováděny v balistické laboratoři **Prototypa-ZM s.r.o. Brno**. Bylo vylepšeno experimentální zařízení tak, aby svými technickými parametry (konstrukce, hmotnost, pohyb zátěže) lépe modelovalo procesy probíhající při reálném impaktu. K simulaci účinku střel na živou tkáň, byl použit blok 10% balistické želatiny (Ž-10).

Kostra experimentálního zařízení (*obrázek č. 19*) byla vyrobena z hliníkových profilů tak aby byla dostatečně tuhá. Na tuto kostru byla volně zavěšená kovová plošina o rozměru 25 x 40 cm a tloušťce 0,6 cm. Balistický želatinový blok o standardizovaných rozměrech 20 x 20 x 35cm a hmotnosti 13kg byl na této plošině položen, bez jakékoliv fixace. Celková hmotnost pohyblivé plošiny byla 75kg.

KONSTRUKCE Z HLINÍKOVÝCH PROFILŮ



Obr. 19 *Experimentální zařízení modelující chování zasaženého při reálné situaci
[experimentální data]*

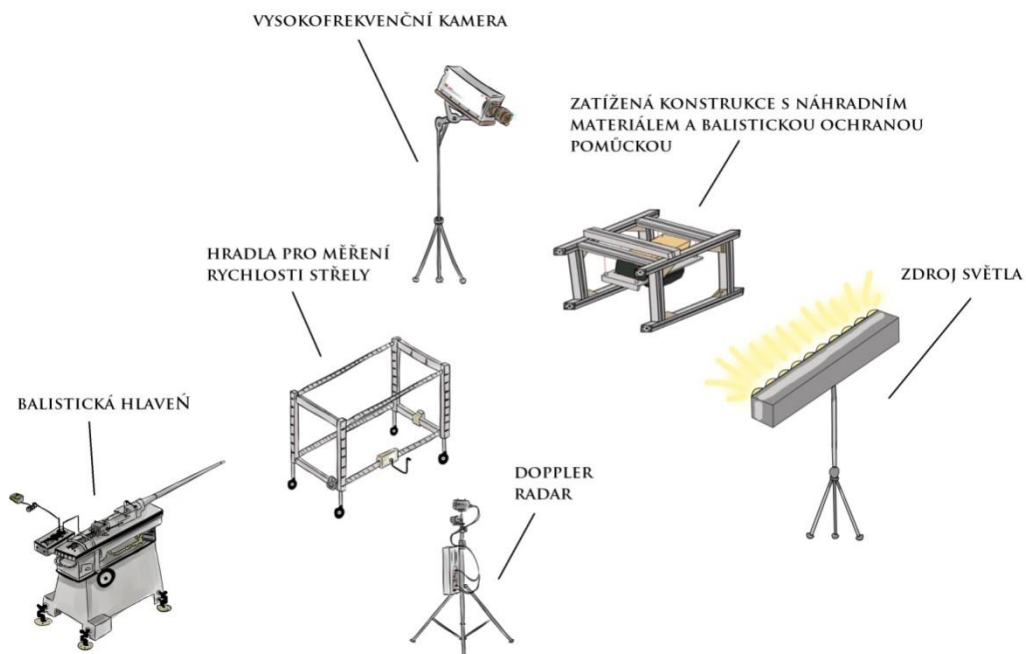


Obr. 20 Experimentální zařízení - pohled zepředu [experimentální data]

Legenda: přední plocha (černý čtverec) balistická ochranná pomůcka. Kalibrace střely přesně do střední plochy bloku před výstřelem. Pohyblivá balistická plošina zavěšená na rigidním kotvícím zařízení.

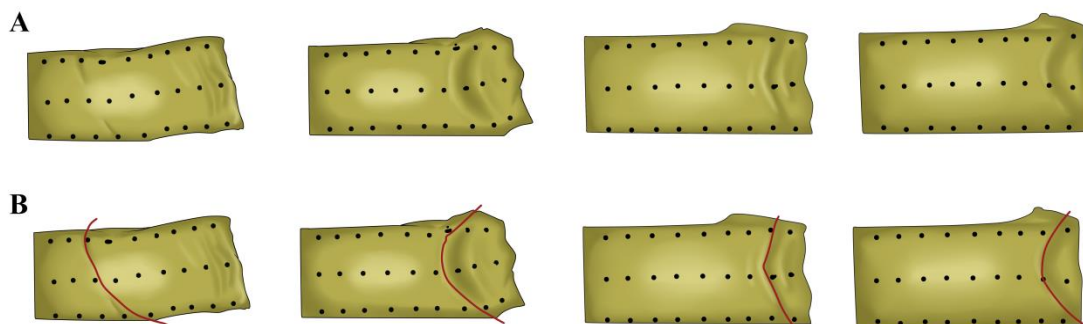
Uspořádání měřicího stanoviště je patrné z obrázku níže. Použitá munice v experimentu 9 mm Luger FMJ, .357 Magnum FMJ a .357 Magnum GOLD DOT. Pomocí balistické hlavně, byl opticky nastaven záměrný bod, který odpovídal středu přední stěny v balistickém bloku. Po impaktu experimentální munice došlo k individuálním průhybům v balistické ochranné pomůcce. Pomocí vysokorychlostní kamery a vhodných analytických vztahů jsme schopni dopočítat **mechanické účinky** v náhradním materiálu za balistickou ochranou a tím **predikovat účinky** na biologickém subjektu (např. lidský organismus).

Jde především o **parametry tlakové vlny**, tj. velikost posunutí a velikost rychlosti, popř. zrychlení, kterým jsou vystaveny tkáně těsně za ochranným štítem. Z jejich velikosti lze pak usuzovat při jakých vlastnostech štítu (tloušťka, elasticita apod.) a projektilu (rychlost, hmotnost, průměr apod.) může dojít k nevratnému poškození tkání.



Obr. 21 *Schematické uspořádání experimentu [experimentální data]*

Projektíl dopadající na ochranný štít zachytí jen část kinetické energie. Zbytek této energie se přenese jako vlna nesoucí **kinetickou** a **tlakovou energii** do viskoelastického tělesa (obrázek č. 22).



Obr. 22 *Deformační vlna postupující zprava - doleva v náhradním materiálu po zachycení experimentální munice do balistické ochranné pomůcky [experimentální data]*

Legenda: A - průstup rázové vlny zprava – doleva v bloku náhradního materiálu - Ž-10% - sekvence jdoucí zprava doleva. B - červená čára zobrazuje velikost a rychlost deformační vlny v NM Ž -10%. Na obrázku je patrna i rychlejší povrchová (Rayleighova) vlna, která předbíhá deformační vlnu ve střední části bloku.

11.4 Dílčí diskuze

Vzhledem k obsáhlé problematice experimentální části jsou vypočtené hodnoty a jednotlivé parametry uváděny jen pro jednu konkrétní použitou munici .357 MAGNUM FMJ 9 mm. Výsledky další použité munice jsou uvedeny v *tabulce č. 7* v závěru této práce.

Nezbytnou roli v experimentu mají **materiálové vlastnosti** balistické ochranné vesty a použitého náhradního materiálu (Ž-10). Předpokládejme, že půjde o homogenní, izotropní, termo-viskoelastický materiál kdy jeho hustota při teplotě 20 °C je $\rho = 1030 [\text{kg m}^{-3}]$ a jeho objemová stlačitelnost je $4.2 \cdot 10^{-10} [\text{Pa}^{-1}]$. Materiálové parametry mohou obecně záviset na velikosti deformace.

K simulaci účinků střel na živou tkáň bylo vyrobeno experimentální zařízení s pohyblivou podložkou (*obrázek č. 20*), na které byl upevněn balistický blok Ž-10 o standardizovaných rozměrech. Na přední stěnu balistického bloku byly připevněny prověřované balistické ochranné vesty (*Strike Face a UHMWPE*) a následně ostřelovány experimentální municí ze vzdálenosti 4.5 m. Celková hmotnost pohyblivé části konstrukčního zařízení dosahovala 75 kg. Na základě takto volených parametrů pohyblivé podložky s volně položeným blokem želatiny je možno výsledky experimentu porovnávat s reálnou situací, včetně výchylky tělesa po impaktu.

Ke stanovení výchylky tělesa jsme použili **bilanci momentů působících sil**.

Projektil dopadající do balistické vesty zachytí jen část kinetické energie. Zbytek této energie se přenesse jako vlna nesoucí kinetickou a tlakovou energii do viskoelastického tělesa. V okamžiku dopadu střely do balistického bloku byl tělesu udělen **moment hybnosti** $L_{MP}F$. V okamžiku srážky je střela v těsném kontaktu s tělesem a proto tvoří jeden hmotný celek, díky němu jsme schopni vypočítat **velikost maximální výchylky** pohyblivé konstrukce ale i pozorovaných markerů (MID 1-9).

V místě kontaktu působí jen povrchová síla. Velikost této síly závisí na **době interakce střely** s povrchem tělesa ∂V . Doba interakce závisí na rychlosti zbrzdění střely a je určena viskoelastickými vlastnostmi obou těles a je rozhodující veličinou pro stanovení účinku střely.

Kontaktní síla při impaktu závisí vedle **maximální velikosti průhybu** $x_{\max}$ ochranné pomůcky i na rychlosti střely v_c . Z tohoto vztahu plyne, že hloubka $x_{\max}$ je úměrná dopadové rychlosti střely v_p a silně klesá s rostoucí elasticitou $\tilde{E}_c$.

Americká armáda provedla v průběhu let celou řadu terminálně balistických experimentů, jenž byly zaměřeny na možnosti predikce ranivých účinků konkrétních typů střel. Výše uvedené hodnoty kritéria vychází z reálného základu, min. pro ochranu vestu *třídy I*. Experimenty pro vyšší třídy odolnosti podle U. S. standardu nebyly nikdy s finančních důvodů úspěšně dokončeny. Mnohé experimenty v rámci programu: *A Method for Soft Body Armor Evaluation: Medical Assessment* (1975), *Body Armor Medical Assessment* (1976) probíhaly v době, kdy byly ochranné pomůcky

teprve vyvíjeny. Další projekty pod názvem *Blunt Trauma Data Correlation* (1975), *Backface Signatures of Soft Body Armors and the Associated Trauma Effects* (1977) vedly k vývoji parametrického modelu úmrtnosti v důsledku tupého traumatu. Posledním přístupem k řešení dané problematiky bylo zaznamenávání průměru a hloubky vtisku. Data získaná střelbou do želatiny byla vztažena na výsledky experimentálního postřelování zvířecího vzorku "koz" a data průhybu v NM byla porovnávána s parametrickým modelem (Juříček, 2017).

Autor Goldfard et. al, 1975 při simulaci na zvířecím vzorku "koz" dospěl k závěru při testování 158 gr. střely revolverového náboje .38 Special při dopadové rychlosti 244 m/s s průměrným vtiskem $47.4 \text{ mm} \pm 3.3 \text{ mm}$ by koza velmi pravděpodobně neutrpěla vážné nebo smrtelné poranění. Z experimentu vychází, že hloubka vtisku 44 mm je blízko horní hranici bezpečnosti. Z klinické praxe U. S. a nepublikovatelných zdrojů jsou ovšem záznamy, kdy zvířecí vzorek, nesoucí pětivrstvý kevlarový panel byl zasažen střelou .38 Special. Přestože střela nepronikla vestou, způsobila pouze povrchové otoky kůže, pitva prokázala, že tupé trauma, způsobilo masivní krvácení zasahující asi 150 cm^3 tkáně Goldfard et. al, in (Juříček, 2017).

U experimentální munice se **hodnoty maximálního průhybu** $x_{\max}$ v BOP pohybovaly **v rozmezí 52 - 108 mm**. Vypočtené hodnoty, jsou téměř totožné s naměřenou výchylkou v NM (*GM*), které byly experimentálně naměřeny pomocí zobrazovacích metod (*CT*, *3D - scanner*). Naměřené hodnoty se lišily pouze u expanzního projektilu Magnum 9 mm GOLD DOT v důsledku deformace projektilu po impaktu. Výpočetní hodnota $x_{\max}$ pro konkrétní náboj dosáhla 108 mm, ovšem pomocí zobrazovacích metod a reálné kaverně v NM byla hodnota 62 mm.

Vzhledem k vrstvovitému uspořádání lidské tkáně (kůže, podkožní vazivo, svalová tkáň, vnitřní orgány apod.) je nezbytné stanovení **elasticity jednotlivých vrstev**. Při interakci projektilu na těleso vycházíme z velikosti neznámého válcového objemu o velikosti průměru D , který odhadujeme z objemu materiálu vytěsněného deformací V_{def} v balistické vestě. Rozměr D určuje **průměr efektivní deformace** v experimentálním případě je jen o něco větší než průměr projektilu d_p (*tabulka č. 7*). Parametry závisí na velikosti elastického modulu balistické vesty a na dynamice kontaktu. U projektilů, které se při dopadu silně zdeformují, tj., $d_p \ll D$ bude docházet k většímu poškození i mimo oblast dopadající střely (*9 mm Magnum GOLD DOT*).

Při **šíření deformační vlny** od místa kontaktu postupuje vlna jednak jako rovinná ve směru nárazu a jednak jako vlna osově symetrická šířící se ve směru kolmém. Výsledkem je šikmá deformační vlna, která zasáhne i oblasti mimo směr nárazu. Vzniká tak **kuželová deformační vlna** s vrcholovým úhlem 2φ .

Předpokládali jsme, že při dopadu jsou pohyby tělesa a projektilu stejné, jde o kontaktní plochu. Maximální **rychlost kontaktní plochy**, která je určena vztahem v

okamžiku dopadu $t = 0$ je rovna $v_c = \omega_B x_{\max}$. Frekvence ω_B může být určena na základě výpočtu interakce projektilu s balistickou vestou anebo experimentálně.

Zrychlení kontaktní plochy je určeno jako časová derivace rychlosti a jeho maximální hodnota nastává v čase $t = \pi / (2\omega_B)$ a jeho maximální hodnota je $\dot{v}_{B\max} = -v_c \omega_B$.

Zbrzdění za ochranným štítem dosáhne maximální hodnoty po určitém čase $t_{\max}$, z čehož dokážeme vypočítat **výchylku kontaktní plochy** x_{distor} . V této vzdálenosti pod ochranným štítem bude tkáň vystavena největším silovým účinkům.

Elastické vlny jsou velmi rychlé $c_l = 1520$ m/s a v důsledku jejich malé amplitudy neabsorbují takové množství energie jako nelineární konvektivní vlna, která je těsně po nárazu dominantní.

Předpokládáme, že poloha bodů x_{0i} , pro $i = 1, 2, 3..$ je pevná (jde o geometrickou polohu materiálového bodu tělesa, před příchodem deformační vlny). Naším cílem je zjistit **změnu rychlostního pole** $v_x(x_{0i}, t_i)$ v okolí těchto geometrických bodů v průběhu času $t_i \geq t_{0i}$, pro $i = 1, 2, 3..$

Rychlost střely (.357 MAGNUM FMJ 9 mm) dopadající na ochranný štít je $v_p = 375$ m/s a za ním ve vzdálenosti $x_1 = 3$ cm je rovna $v_{x_1} = 3$ m/s. Více jak 100 násobné zpomalení je způsobené jednak materiálovými vlastnostmi ochranné pomůcky a jednak absorpcí kinetické energie do materiálu tělesa.

Tudíž při nulové fázi $\eta(x, t) = x - v_{0x}t = 0$ se vlna nedeformuje a postupuje rychlostí v_{0x} . **Amplituda vlny** $v_{0x} = 3.6$ m/s, která je charakteristickou rychlostí deformace tělesa za ochranným štítem. Amplituda je určena především velikostí času interakce (frekvencí $\omega = 2\pi/\tau$) v našem případě $\tau/4 = 0.013$ s a viskozitou tělesa ν .

Obecné řešení můžeme využít ke stanovení charakteristické rychlosti šíření vlny tělesem (BG). Maximum rychlosti $v_{0\max}$ za ochranným štítem vypočteme podle vztahu a je přibližně rovno v_c **rychlosti kontaktní plochy**, konkrétně 8.3 m/s. Díky viskoelastickým vlastnostem štítu se silně tlumí a tělesem se šíří charakteristickou rychlostí $v_{0x} = 3.6$ m/s.

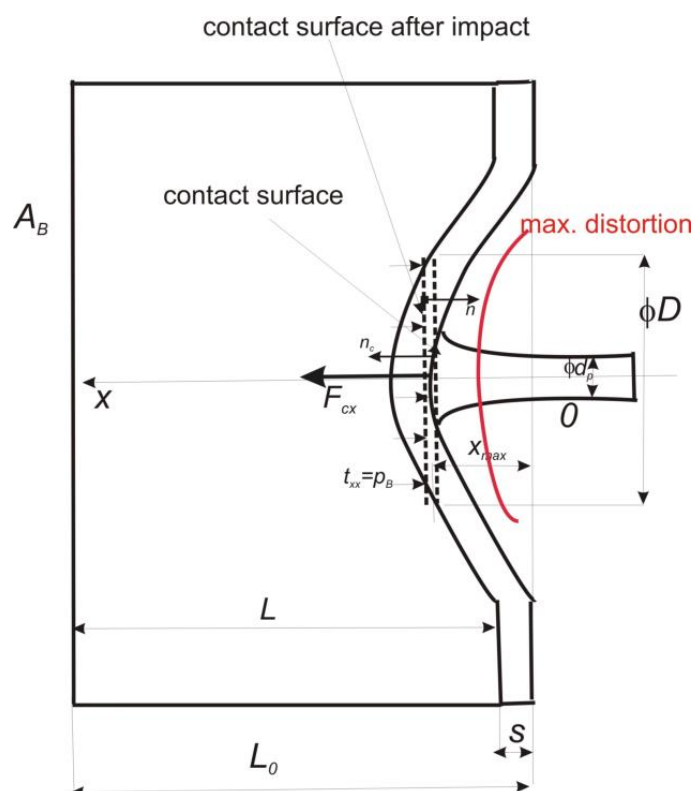
Parametr $\varepsilon_1(t_1)$ nazýváme **parametrem zestrmení**. Maximální hodnotu parametru zestrmení stanovíme z podmínky neexistence derivace rychlostního pole v bodě $x_{01} = 3$ cm = konst.

11.5 Dílčí shrnutí

Při daných geometrických rozměrech a materiálových vlastnostech balistické ochranné pomůcky, projektilu a chráněného tělesa (v našem případě balistické želatiny Ž-10). Za předpokladu, že se veškerá energie střely disipuje při nárazu lze stanovit její **deformační účinek charakterizovaný maximální hloubkou průhybu balistické vesty v ploše kontaktu (zbraňový systém 9 mm .357 Magnum FMJ)**

$$x_{\max} = \frac{v_p}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{\tilde{\mu}_c}{\tilde{E}_c} \right)^2 + \frac{16m_p}{\pi d_p^2 \tilde{E}_c}} - \frac{\tilde{\mu}_c}{\tilde{E}_c} \right] \approx \frac{v_p}{2} \sqrt{\frac{16m_p}{\pi d_p^2 \tilde{E}_c}} = \frac{375}{2} \sqrt{1.33 \cdot 10^{-7}} = 68 \text{ mm}$$

kde v_p, m_p, d_p jsou rychlost dopadající střely, její hmotnost a průměr. Odpovídající hodnota $x_{\max} = 68 \text{ mm}$, která koinciduje s experimentem, viz *obrázek č. 23*.



Obr. 23 Schéma interakce projektilu s ochranným štítem [experimentální data]

Legenda: *contact surface after impact* - plocha zasažená po impaktu; *max. distortion* - vzdálenost pod BOP která je vystavena největším deformačním účinkům

Pro stanovení této veličiny jsou rozhodující materiálové parametry tj.,

$$\tilde{E}_c = E_c \frac{(E_p L_0 + E_B l_{p0})}{E_p L_0 (L_0 + l_{p0})}, \text{ kde } E_c = \frac{E_B E_p (L_0 + l_{p0})}{L_0 E_p + l_{p0} E_B}, E_B = \frac{E_g E_{ps} (L + s)}{L E_p + s E_g}$$

kde E_B, E_p jsou postupně elastické moduly tělesa včetně ochranného štítu a projektilu. $L_0 = L + s$ je součet tloušťky tělesa L a tloušťky ochranného štítu s . Elastický modul E_B je určen elastickým modulem tělesa (lidského těla) E_g a elastickým modulem projektilu.

Pro stanovení dynamického účinku projektilu (generace postupné deformační vlny) je třeba stanovit dobu zastavení projektilu v balistické ochranné pomůcce. Tato doba je přibližně rovna hodnotě $\tau/4 = \pi/(2\omega_B)$ kde podle vztahu platí

$$\omega_B = \sqrt{\frac{E_B}{m_B}} = \sqrt{\frac{(A_B - A_p) \cdot 7.61 \cdot 10^9}{75}} = \sqrt{79.6 \cdot 10^6 (D^2 - d_p^2)} = 8921 \cdot \sqrt{(D^2 - d_p^2)},$$

Vliv členů obsahující viskozitu tělesa a projektilu jsou pro výpočet frekvence ω_B zanedbatelné. Materiálové parametry E_B, M_B jsou definovány zjednodušenými vztahy tj.

$$E_B = \frac{A_B E_B}{L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c = \frac{\pi D^2 E_B}{4 L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c,$$

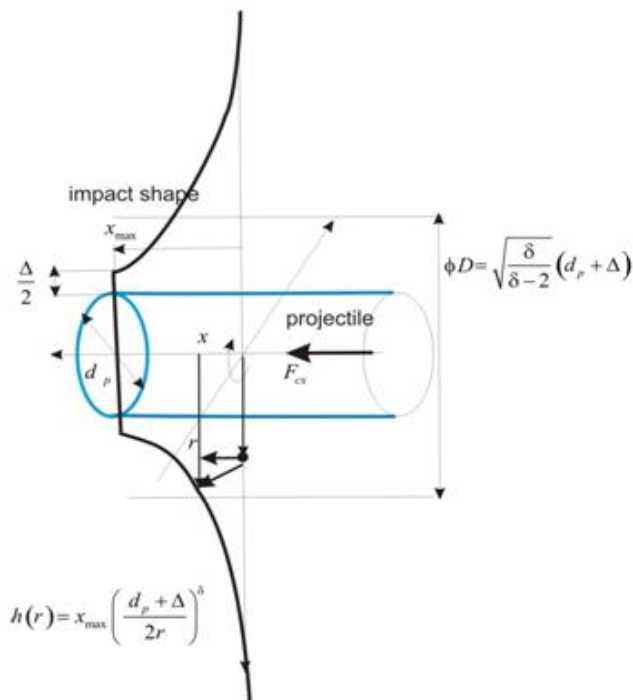
kde použité elastické moduly E_B, E_p jsou stejné jako při výpočtu průniku $x_{\max}$.

Neznámou velikost průměru D odhadneme z objemu materiálu vytěsněného deformací. Relativní deformace ochranného štítu lze pro případ velkých deformací aproximovat dle vztahu

$$h(r) = x_{\max} \left(\frac{d_p + \Delta}{2r} \right)^\delta \quad \text{pro } r \geq \frac{d_p + \Delta}{2}$$

Parametry $x_{\max}, \delta, \Delta$ závisí na typu ochranného štítu a na dynamice kontaktu. Objem vytěsněný deformací je

$$V_{def} = \pi \int_0^{x_{\max}} r^2 dx = \pi \frac{(d_p + \Delta)^2}{4} x_{\max}^{2/\delta} \int_0^{x_{\max}} \frac{dx}{x^{2/\delta}} = \pi \frac{\delta (d_p + \Delta)^2 x_{\max}}{4(\delta - 2)}$$



Obr. 24 Tvar povrchu ochranného štítu po kontaktu s projektilem. Model interakce.

Zavedení deformací vytěsněného objemu $V_{def} = \pi D^2 x_{max} / 4$ [experimentální data]

Legenda: *Front shot* - max. průhyb projektilu v NM po impaktu do BOP; *Impact shape* - konečný tvar průhybu balistické vesty

Hodnoty $\delta = 2.85, \Delta = 0$ byly nařizovány podle experimentu tak aby $\omega_B = 120 \text{ s}^{-1}$, Ze vztahu plynou důležité závěry:

- při $D \rightarrow d_p$ čas interakce τ roste ($\omega_B = 2\pi/\tau \rightarrow 0$) a nárazem aktivovaná hmota se zmenšuje, až v limitním případě $D = d_p$ dochází k "čistému průstřelu".
- velikost útlumu $\gamma_B = 1.45 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ je tak malá, že nemá dobu interakce vliv a stává se pro další úvahy nepodstatná.

Dalším důležitým parametrem je **maximální rychlost kontaktní plochy**, která je určena vztahem v okamžiku dopadu $t = 0$ je rovna

$$v_c = \omega_B x_{max} = 120 \cdot 0.068 = 8.16 \text{ m/s}$$

Podobně lze určit **zrychlení rovinné deformační vlny** ($\dot{v}_B$) jehož maximální hodnota v našem případě je

$$\dot{v}_B \square -v_c \omega_B \sin(\omega_B t) \Big|_{t=t_{max}} = -v_c \omega_B \sin(1) = -8.16 \cdot 120 \cdot 0.841 = 823 \text{ ms}^{-2} = 84g$$

Této hodnoty dosáhne vlna za časový úsek $t_{\max} = 1/\omega_B = 0.0083\text{s}$, což odpovídá výchylce pro konkrétní zbraňový systém

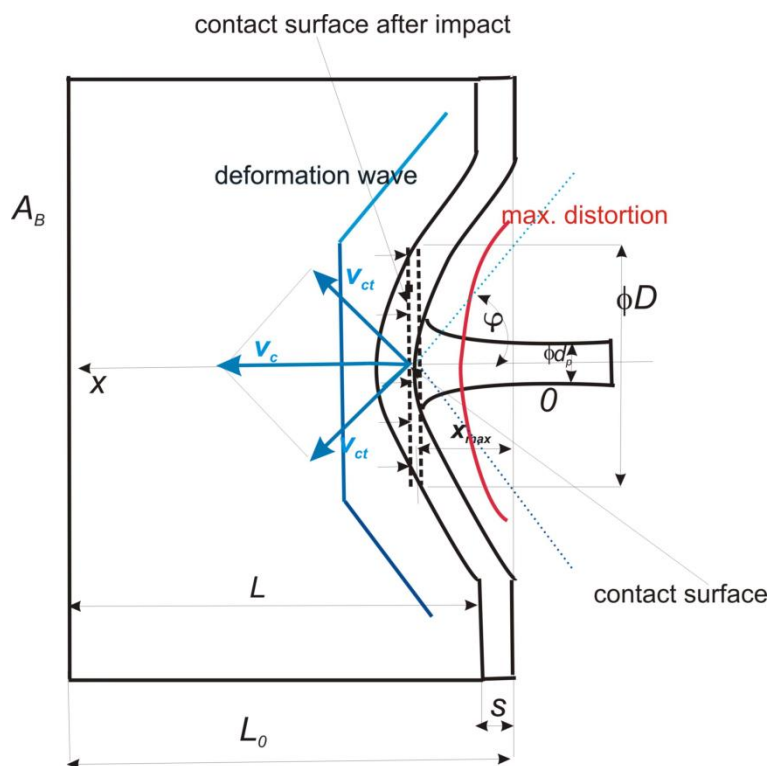
$$x_{\text{distor}} = x_{\max} \sin(1) = 0.069 \cdot 0.841 = 0.058 \text{ m} = 58 \text{ mm}$$

viz **červená čára (max. distortion)** na obrázku č. 23. Tato vzdálenost určuje oblast maximální deformace pod balistickou ochranou pomůckou a její souvislost s průměrem D .

Zrychlení na kuželové ploše ($\dot{v}_{ct}$) je rovno

$$\dot{v}_{ct} = \omega_B v_{ct} = 120 \cdot 0.84 = 101 \text{ m/s}^2 = 10.3g.$$

Hodnoty zrychlení jsou ve vzdálenosti $D = 2d_p$ od centra dopadu přibližně 8 krát menší. U projektilů, které se při dopadu silně zdeformují (zvětší se D) bude docházet k většímu poškození i mimo oblast dopadající střely.



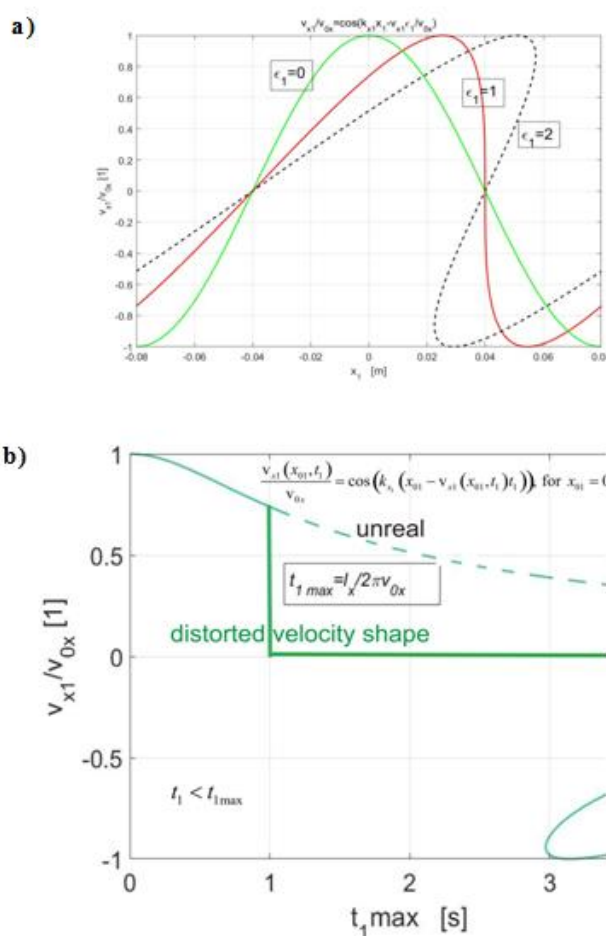
Obr. 25 Deformační vlna se v prostoru pod ochranným štítem šíří jako vlna rovinná (v_c) ve směru nárazu, ale i jako vlna osově symetrická ($\dot{v}_{ct}$) šířící se ve směru kolmém - vlna šikmá [experimentální data]

Legenda: *contact surface after impact* - plocha zasažená po impaktu; *max. distortion* - vzdálenost pod BOP která je vystavena největším deformačním účinkům; *deformation wave* - šířící se deformační vlna; *contact surface* - kontaktní plocha

Jak je patrné na *obrázku č. 26* dochází v důsledku zestrnění mechanické poruchy k nárůstu gradientu rychlosti a tím i **díky viskozitě μ k jejímu útlumu**. Dále jsme schopni (hustotu mechanické energie, disipovanou mechanickou energii, gradient rychlosti nebo disipovaný výkon).

$$\text{Ze vztahu } t_{xx,dis} = \frac{3\rho v_{0x}^2}{8\cos^2\left[\frac{v_{0x}}{2a}(x-v_{0x}t)\right]} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3}\right] \text{ pro } t \leq t_{1\max}$$

plyne, že v tomto přiblížení závisí hustota přenášené mechanické energie jen na velikosti **charakteristické rychlosti deformace tělesa**.



Obr. č. 26 Vývoj rychlostního pole v bodě MID1 na čase po dopadu projektilu [experimentální data]

- a) Zestrnění harmonické poruchy v důsledku parametru $\epsilon_1(t_1)$, který narůstá s časem
- b) Průběh rychlosti, tak jak je vnímán v poloze x_{01} . V čase $t_1 \leq t_{1\max}$ dochází k mírnému poklesu rychlosti a v čase $t_1 > t_{1\max}$ rychlost poklesne v důsledku velké disipace mechanické energie v oblasti zestrnění (důsledek viskozity) k nule

Výsledky numerického řešení odpovídají jak kvalitativně (zestrmení poruchy v čase $t_{1\max} = 8.3 \text{ ms}$, pokles rychlosti se vzdáleností), tak i kvantitativně jak analytickému řešení, tak i experimentu.

Na *obrázcích č. 26 a) + b)* je patrné, že podmínka je splněna pro

$$\varepsilon_1(t_1) = v_{0x1} k_{x_1} t_{1\max} = 1, \text{ tj. } w = \frac{v_{x1}(x_{01}, t_1)}{v_{0x1}} = -\frac{\pi}{2}$$

tedy pro $t_1 = t_{1\max}$. Pro $\varepsilon_1(t_1) = 1$ se stává čelo vlny kolmé a pro $\varepsilon_1(t_1) > 1$ se vlna stává nefyzikální. Podmínku zestrmení $\varepsilon_1(t_1) = v_{0x1} k_{x_1} t_{1\max} = 1$, můžeme upravit pro postupnou vlnu jejíž fáze je $\omega t - k_x x = 0$

$$\omega = \frac{k_x x}{t} = k_x v_{0x1} = \frac{k_x v_{0x1} t}{t} = \frac{1}{t_{1\max}}, \text{ nebo } t_{1\max} = \frac{1}{v_{0x} k_x} = \frac{l_x}{2\pi v_{0x}} = \frac{1}{\omega}$$

Závěrem můžeme konstatovat, že v elastickém prostředí, které považujeme za nehomogenní (tj. lidský organismus) vznikne v důsledku rázu - **zestrmená konvektivní vlna**, která je charakterizována rychlostí dopadu a velikostí průhybu BOP. Tato vlna způsobuje "lokálně" **deformaci s velkým gradientem**, která není, dle provedených experimentů prakticky tlumena.

V okamžiku zestrmení vlny dochází k **náhlé skokové deformaci** v čase $t_{1\max} = 8.3 \text{ ms}$ a ve vzdálenosti $x_{\text{distor}} = 58 \text{ mm}$ pod balistickou ochranou pomůckou pro konkrétní náboj (.357 Magnum FMJ). **Oblast největšího zasažení** tj. maximální hodnota rovinné deformační vlny dosahuje 1.59 násobku průměru použitého projektilu.

Dále vzhledem k **maximálnímu zrychlení** ve směru ($82.3 \text{ m}^2/\text{s}$) a mimo směr dopadu ($10.1 \text{ m}^2/\text{s}$), jsme schopni predikovat traumatické poškození převážně parenchymatózních orgánů (tj. tkání s ↓ viskoelastickými vlastnostmi) ležící v této vzdálenosti (játra, ledviny, pankreas).

Tato relace má zásadní význam pro stanovení maxima rychlosti, zrychlení a disipace u vln konečné amplitudy šířících se viskoelastickým tělesem (tkání).

Níže v souhrnné *tabulce č. 7* uvádíme další experimentální parametry pro použité zbraňové systémy.

Tab. 7 Experimentálních parametrů charakterizující defenzivní účinky pod BOP
[experimentální data]

ZBRANOVÝ SYSTÉM	DEFINOVANÝ VZTAH	rovnice	MAGNUM FMJ 9 MM	.357 MAGNUM GOLD DOT *	LUGER 9 MM
Max. průhyb BOP - analyticky [mm]	$x_{\max}$	DisplayI	68	103	52
Max. průhyb BOP - vysokofrek. kamera	$x_{c\max}$		69	62	55
Doba interakce [ms]	$t_{\text{int}} = \pi / (2\omega_B)$	DisplayI	13	12	41
Oblast největší deformace [mm]	$0.841x_{\max}$		57	85.7	43
Rychlost kontaktu [m/s]	$\omega_B x_{\max}$	(5.45)	8.16	13.26	2.38
Rychlost zestržení vlny [m ² /s]	$t_{\max} = \frac{1}{\omega_B}$	(4.54)	8.3	7.6	2.2
Max. zrychlení tkáně ve směru dopadu [m ² /s]	$0.841\omega_B^2 x_{\max}$	(5.46)	82.3	85.0	91.7
Max. zrychlení tkáně mimo směr dopadu [m ² /s]	$0.841\omega_B^2 x_{\max} \sin \varphi$	(4.57)	10.1	68.9	10.5
Oblast největšího zasažení	$r = \sqrt{1 + \frac{\omega_B}{\sqrt{\frac{E_B}{m_B} - \left(\frac{M_B}{2m_B}\right)^2}} \cdot c}$	(4.50)	1.59	1.64	1.23

Legenda: BOP - bezpečností ochranná pomůcka, * - střela s vysokým expanzním účinkem a deformací projektilu na vícečetné fragmenty, z tohoto důvodu nejsou některé z analyticky vypočtených parametrů v přímé korelaci s experimentálními hodnotami

Použité náboje dosahovaly přibližně stejných **dopadových rychlostí** (384.4 ± 17.6 m/s) a hmotnosti projektilu (8.61 ± 1.64 g). Základní konstrukční a balistické údaje byly ovšem pro konkrétní munici rozdílné, což má zásadní vliv.

Např. zbraňový systém (*.357 Magnum GOLD DOT*) má variabilní hodnoty v analytických výpočtech oproti reálnému experimentu. Vycházíme ze skutečnosti vysokého expanzivního účinku střely, která se po dopadu na překážku kompletně zdeformuje na drobné fragmenty. V min. kapitole (parametrizace - kaverny tabulka kvalifikace zraňujícího účinku) jsou zaznamenány fatální účinky s vysokým zastavovacím účinkem (OSS) této střely při zásahu lidského organismu - **bez užití balistické vesty**.

Vycházíme ze zkušeností, že **neexpanzní střely** pronikají hlouběji díky svého blízkosti efektivního průměru k průměru projektilu, tj., $D \approx d_p$ a lépe vyhovují předložené teorii. Hodnota maximálního průhybu $\chi_{\max}$ náboje *.357 Magnum GOLD DOT* v experimentu s BOP byla ve vzdálenosti 62 mm, což je oproti analytickému výpočtu 103 mm, značně odlišné. Důvodem jsou expanzivní účinky střely, díky nimž se deformační oblast rozloží na větší plochu.

Lze tedy shrnout, že při nárůstu **efektivního průměru** D dochází k poklesu morfologických a strukturálních změn měkkých tkání při užití konkrétní BOP. Z těchto důvodů směřuje další experimentální výzkum k nařizování deformačních účinků expanzních střel.

12 Závěr

Střelná poranění způsobená malorážovými střelami jsou vedle střepinových poranění z hlediska relativní četnosti dominantní skupinou válečných poranění v podmínkách použití konvenčních zbraní. Rovněž v rámci civilních „zbrojních“ aktivit se střelná poranění objevují stále častěji (Juříček, 2017).

Předložená doktorská dizertační práce, zpracována na téma - "**Simulace a experimentální hodnocení účinků malorážového střeliva vznikajících pod balistickou ochrannou pomůckou**", řeší uvedenou problematiku s ohledem na terminálně-balistické působení užitých zbraňových systémů u nejčastěji užívaných náhradních materiálů, ale i matematických modelů nafitovaných dle cílů biologické povahy.

Práce je rozdělena na část teoretickou a dílčí experimentální studie.

Autor se snaží v úvodní experimentální části o objektivizaci a parametrizaci jednotlivých ranivých účinků vybraného malorážového střeliva na živou sílu vč. kvantifikace hodnocení účinků pomocí mezinárodně uznávaných kritérií účinnosti. Kompletní přehled kritérií účinnosti souhrnně zhodnotil světoznámý balistik Prof. Kneubüehl už v r. 1990 (Kneubüehl, 1990, 2008).

Z analýzy struktury uvedených kritérií účinnosti vyplývá význam balistického experimentu, pro určování základních složek hodnotícího kritéria (*tab. č. 19; kap. 14.4*). Mezi hlavní pozorované veličiny patří **objem dutiny** vytvořený střelou v náhradním materiálu, také její **tvar a poloha střelného kanálu** vzhledem k předpokládanému umístění vitálních orgánů. Další kritéria byla odvozena analyticky pomocí vhodně zvolené fyzikální veličiny. Mezinárodně uznávaná kritéria hodnotíme na základě hybnosti střely, energie střely a v neposlední řadě vychází z empirických zkušeností a literárních údajů. Vývoj kritérií účinnosti střely umožňuje predikovat stupeň tkáňového poškození. Autorem zvolena vlastní experimentální kritéria účinnosti (**WE₁**, **PA₁** a **PA₂**) poukazují na skutečnost, že mezi faktickým účinkem a potenciálem střely způsobit zranění může být velká variabilita - mimo jiné i v závislosti na stanovených podmínkách. Domníváme se, že se nám podařilo jasně interpretovat možnosti pro validnější vyhodnocení střel. Srovnáme-li naši parametrizaci s mezinárodně uznávanými kritérii (Hatcher 1927,1935; Matunas 1984; Taylor 1948; Weigel 1975; Sellier 1979; Marshall & Sandow, 1992) je zřejmé, že je možné definovat použitelné kvantifikátory, jak s důrazem na kinematické pohybové parametry střely, tak zvýraznit geometrii střelných kanálů. Aby bylo možné získat úplné informace, je vždy nutné specifikovat podmínky, které byly zohledněny při výpočtu kritérií, protože pohyb střely a jejich skutečné účinky silně závisí na prostředí, ve kterém se vyskytují.

Seřadit účinky jednotlivých typ střel v rámci hodnotících kritérií lze pouze informativně, a proto lze jen velmi těžko vytvořit **obecně platné kritérium** pro hodnocení účinnosti střel s výrazově odlišnými konstrukčními a balistickými parametry.

Kromě analytického řešení kritérií účinnosti puškových střel, které vychází z matematických modelů sestavených po předchozí identifikaci biologického systému, je základním metodologickým přístupem, stejně jako u střel pro pistole a revolvery, **balistický experiment**. Těžiště při jeho využití bylo rovněž přesunuto z důvodů ekonomických, personálních a především etických od postřelování biologických cílů k postřelování jejich náhrad (Juříček, 2017).

Dlouhodobá praxe především zahraničních pracovišť (Jussila 2004; Salisbury & Cronin 2008; Schyma & Madea 2012) potvrdila, že **balistická želatina a glycerínové mýdlo** jsou nejvhodnějšími náhradními materiály ke studiu jevů v oblasti ranivé balistiky. S ohledem na blízké vlastnosti umělejších materiálů a živých tkání lze předpokládat, že obdobné účinky by hodnocená střela vyvolala i při průniku svalovou, tukovou, vazivovou a jinou měkkou tkání (See et al., 2009).

Balistické experimenty provedené v rámci hodnocení ranivých účinků vybraných zástupců zbraňových systémů (*Luger 9mm*, *Black mamba 9 mm*, *Tokarev 7,62 x 25 olověné jádro*, *Tokarev 7,62x25 ocelové jádro*, *.357 Magnum 9mm.*, *Gold Dot 9 mm*, *.44 Remington Magnum*) prokázaly, že pro jejich kvantifikaci jsou vhodné následující parametry získaného střelného kanálu v bloku umělého materiálu.

- **celkový objem dutiny střelného kanálu**
- **základní rozměrové charakteristiky** střelného kanálu určující jeho tvar a geometrické uspořádání
- **maximální hloubka vniku střely** do bloku NM a **délka přímého úseku** střelného kanálu
- vnější **tvar střely** a její **vnitřní uspořádání**
- **hmotnost střely** a její **dopadová rychlost**

Z konkrétních výsledků je patrné, že revolverové střelivo ráže .357 Magnum Gold-Dot s expanzivní střelou vytvořilo ve zkušebním bloku střelný kanál, který je svým tvarem a velikostí typický pro střely tohoto konstrukčního uspořádání (*obrázek č. 17*). Střela v průběhu svého průniku náhradním materiálem předala až 91% své kinetické energie a dosáhla **maximální průměru dočasné dutiny až 142 mm**. Dle kritéria *One Shot Stop* dle Marshalla a Sandowa z roku 1992, by optimálního výsledku by bylo dosaženo při OSS = 100 %. To by znamenalo, že při každém zásahu do trupu lidského organismu došlo k vyřazení útočníka z akce. Tyto vlastnosti neprokázal žádný z testovaných nábojů, ale některé z nich se k této hodnotě značně přiblížily .357 Magnum Gold-Dot 96 % a .44 Remington Magnum 90%.

V další části experimentu hovoříme o balistických ochranných pomůckách (BOP). Ty jsou obvykle tvořeny několika vrstvami tkaniny a/nebo netkaného panelu vláken. Balistická odolnost závisí převážně na druhu materiálu a počtu vrstev v BOP.

V našem experimentu byly zatěžovány para-aramidová vlákna vyrobená z kevlaru o celkovém počtu 15- ti vrstev, kdy orientace jednotlivých vláken v každé vrstvě byla multiaxiální. Dále pak polyamidová vlákna UHMWPE o počtu 40-ti vrstev, kdy směr vláken byl na sebe kolmý.

Hodnoty byly zaznamenány v analytické a grafické podobě (*graf. č. 1*). Výsledky poukazují na zvyšování napětí skokovým způsobem pro jednotlivé materiály BOP a to převážně z důvodu vnitřní napjatosti vláken. Základní rozdíly použitého materiálu charakterizuje jejich **plošná hmotnost**, konstrukce použitých tkanin a také jemnost použitého primárního vlákna. Např. vysoce odolná polyethylenová ultraorientovaná vlákna jsou 10 x pevnější než ocel a vlákno o průměru 1 mm unese až 240 kg hmotnosti. Nejen tyto parametry hrají důležitou technickou roli při absorpci energie střely. Parametr, který dále ovlivňuje balistickou odolnost, je **hustota vláken** (*počet vláken na cm²*) a mechanismus vazby tkanin; tyto vlastnosti ovlivňují plošnou hmotnost použité tkaniny (Juříček, 2017)

Polyethylenová vlákna (UHMWPE) vykazují nižší plošnou hmotnost (115 - 185 g.m²). Aramidová vlákna (*Strike Fire*) disponují vyšší gramáží, nejčastěji v rozmezí (200 - 450 g.m²) tyto hodnoty odpovídání experimentálně užitým BOP. Zkušební vzorky (5-10mm) prokazují vysoký modul pružnosti ale i vysokou pevnost v tahu, experimentálně zjištěné hodnoty dosahují průměrných hodnot v rozmezí 220 - 323 MPa. Doložená obrázková dokumentace z digitálního mikroskopu a záznamů z Mikro-CT může ukázat na jednotlivé penetrační schopnosti použitých zbraňových systémů. Konkrétně u **UHMWPE** došlo k penetraci jednotlivých vrstev BOP v rozmezí 8 - 16 z celkového počtu 30 vrstev. BOP z **Strike-Face** byla penetrována mezi 3 - 7 z celkových 15 vrstev.

Schopnost nekompletní penetrace BOP a rozložení disipované energie na větší plochu, popř. do většího objemu, patří mezi základní funkce balistické ochrany. Nicméně i přes veškerá opatření, je určité množství energie transformováno do organismu. Důsledkem je traumatizující poškození tkání nacházející se v kontaktu pod ochrannou pomůckou. Vývoj nových balistických materiálů se mílovými kroky posouvá kupředu. Novinkou jsou produkty, které mají původ v přírodních vláknech - *vlákna pavoučích sítí*. Tato vlákna disponují vysokou elasticitou a extrémní pevností (pevnost v tahu = 1.75 GPa a v tlaku 0.05 GPa). Tato vlákna patří v současné době k jednomu z nejpevnějších, společně se syntetickými, která jsou vyztužena karbonovými vlákny. Při jejich použití je nutno mít na zřeteli i ekonomická hlediska.

Autor se v poslední experimentální části snaží o zjednodušenou analýzu interakce střely s BOP. Pro splnění požadavků daného standardu musí ochranný prostředek odolat postřelování malorážovým střelivem za přesně daných podmínek. Výsledkem experimentální části jsou analytické vztahy dovolující stanovit mechanické účinky na materiál nacházející se pod BOP - je však nutné o podrobnou deskripci systému **STŘELA - BALISTICKÁ VESTA - BIOLOGICKÝ CÍL** pomocí vhodného matematického vyjádření. Nutné poznamenat, že k porovnání hloubky průhybu

balistické vesty a možnosti poranění dochází k mnoha aproximacím a předpokladům podobnosti (Juříček, 2017).

Vyhodnocením vtisku, lze obdržet maximální hodnotu makroskopické deformace, tj., **maximální velikosti průhybu** ($x_{\max}$) zadní plochy BOP. U experimentální munice se tato hodnota pohybovala v rozmezí 52 - 108 mm. Mezinárodní normy určují maximální hloubku průhybu v podkladovém materiálu (U.S. - 44 mm, Německo - 22 mm). Základním problémem při vyhodnocování průhybu BOP s následným "vtiskem" v podkladovém materiálu je v české normě ČSN 395360 velikost o objemu 8 ml a maximální hloubkou vtisku 25 mm. Omezení této hloubky průhybu je tady také měřítkem množství energie, kterou je tělo schopno absorbovat bez výrazného mechanického poškození (Juříček, 2017).

Porovnání hodnot maximální velikosti hloubky (objemu) průhybu nelze brát takto absolutně. Je třeba zohlednit vlastní uspořádání a podmínky zkoušek jednotlivých standard. Z experimentu provedených Goldfardem et al. (1975) vychází, že hloubka vtisku 44 mm je blízko horní hranici bezpečnosti pro revolverový náboj .38 Special. Americká armáda začala připravovat i testy pro ráže 9 mm Luger a .357 Magnum, ty však nebyly dokončeny (zastaveno financování) a nebyla publikována žádná dostupná výzkumná zpráva.

Standardy NIJ 0101 vycházejí z předpokladu, že hodnota 44 mm hloubky vniku je maximum, které je přípustné i pro střely s vyšší kinetickou energií. Není však doložen žádný relevantní výzkum v této oblasti (Hanlon & Gillich, 2012).

Díky vrstvitému uspořádání lidské tkáně je nezbytné stanovit elasticitu pro jednotlivé vrstvy. Při interakci projektilu a tělesa vycházíme z velikosti neznámého válcového objemu o efektivním průměru velikosti D , který odhadujeme z objemu materiálu vytěsněného deformací V_{def} v balistické vestě. **Efektivní průměr deformace** pro užití munice byl 1.48 - 1.6 násobku průměru použitého projektilu d_p . Mezi důležité parametry určující deformační schopnosti daného projektilu patří, **maximální rychlost kontaktní plochy** (v_c), jenž u experimentální munice dosahuje průběrné hodnoty 7.82 ± 5.44 m/s a maximální zrychlení tkáně v přímém směru tj. **zrychlení rovinné deformační vlny** ($\dot{v}_B$) které dosahuje 87 ± 4.7 m²/s. Další dílčí výsledky jsou k nalezení v *tabulce č. 7*.

Nutno poznamenat fakt, že se deformační vlna v prostoru pod BOP šíří nejen jako vlna rovinná, ale i jako **vlna osově symetrická** ($\dot{v}_{ct}$) (*obrázek č. 25*). Analyticky vypočtené hodnoty dosahující průměrné hodnoty 29.9 m²/s. Vzhledem k této skutečnosti jsme schopni predikovat traumatické poškození převážně parenchymatózních orgánů (játra, ledviny, pankreas) ležících ve velmi malé vzdálenosti od šířící se přímé deformační vlny.

Dále můžeme konstatovat, že v prostředí, které považujeme za nehomogenní (tj. biologický cíl) vznikne v důsledku rázu - **zestrmená konvektivní vlna**. Tato vlna je

charakterizována rychlostí dopadu projektilu a velikostí průhybu v ochranné pomůcce. Na *obrázcích č. 22 a 26* můžeme pozorovat průběh šíření deformační vlny, kdy v okamžiku zestržení dochází k náhle vzniklé **skokové deformaci** s lokálně velkou disipací mechanické energie. Tato disipace je vždy doprovázena velkými tvarovými změnami (velké deformace), které mohou vest i k trvalému poškození tkáňové struktury. U experimentálních zbraňových systémů dochází ke skokové deformaci v čase $t_{1\max} = 5.25 \pm 3.05$ m/s a ve vzdálenosti 64.35 ± 21.45 mm pod BOP. Tato vzdálenost určuje **oblast maximální deformace** a její souvislost s efektivním průměrem D a odpovídajícím vytěsněním objemu tkáně pod ochrannou pomůckou.

Statistické údaje z konce minulého století (1990 - 1999), pocházející z USA ukazují na skutečné případy zabití policistů a to i přes to, že byl při služebním zákroku vybaven BOP. Při hodnocení poskytnutých údajů, byla tato smrtelná poranění posuzována ze dvou kvalitativních hledisek - *a) hledisko usmrcení policisty podle příčiny smrti a b) hledisko umístění zásahu.*

Ze 101 policistů usmrčených zásahem do horní části trupu, bylo 40 případů, kdy střela prošla mezi panely ochranné vesty nebo otvory pro ruce, 20 hlášených úmrtí nastalo v důsledku probití BOP a bylo způsobeno vždy jádrovou střelou z pušky, proti které nebyla BOP navržena, zbývající úmrtí (41) by z důvodu zásahu nad/pod balistický panel (FBI Uniform Crime reports, 1991 in Juříček, 2017).

Experimentální i analytická data, společně se získanými profily, mohou přispět k objektivizaci traumatického poškození měkkých struktur biologických tkání pod BOP. Deformační účinky konkrétních testovaných zbraňových systémů vzhledem k mezinárodním i tuzemsky uznávaným standardům překračují povolené velikosti vtisku event. vytlačeného objemu.

Závěrem předložené dizertační doktorské práce může být konstatováno, že experimentální zbraňové systémy a jejich deformační účinek, charakterizovaný maximální hloubkou průhybu při užití BOP dle NIJ standardu **nepovede** ke "smrtelnému" zranění v korespondenci s (FBI Uniform Crime reports, 1991). Ovšem vzhledem k mechanickým vlastnostem biologických měkkých tkání **můžeme predikovat reverzibilní poškození** např. parenchymatózních orgánů (fisura, ruptura, lacerace, hematoma, hemoragie), která následně mohou vést k delší rekonvalescenci či zdravotní nezpůsobilosti jedince.

K širšímu ověření závěrů s ohledem na materiální a finanční náročnost dalších plánovaných experimentů bude nutné balistické experimenty rozšířit o větší počet pokusů, širší sortiment střeliva a v neposlední řadě pokračovat v experimentálním testování i dalších moderních balistických pomůcek. Jejich budoucnost je zde řešena s ohledem na možnosti zvyšování účinnosti balistické ochrany a komfortu jejího nošení. Výsledky experimentů mají zásadní význam pro konstrukci aktuálně užívaných balistických ochranných systémů nejen pro AČR a jiných bezpečnostních složek v ČR, ale i v zahraničí.