

UNIVERZITA KARLOVA
Fakulta tělesné výchovy a sportu

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

Doktorská disertační práce

Vedoucí disertační práce:

Vypracoval:

Doc. PaedDr. Karel Jelen, CSc.

MUDr. Mgr. Richard Billich

Praha, 2019

Prohlašuji, že jsem závěrečnou (doktorskou disertační) práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 23.11.2018

.....

podpis doktoranda

Evidenční list

Souhlasím se zapůjčením své doktorské disertační práce ke studijním účelům. Uživatel svým podpisem stvrzuje, že tuto doktorskou disertační práci použil ke studiu a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno a příjmení:

Fakulta / katedra:

Datum vypůjčení:

Podpis:

"Nesbírej oblaka, nechod' po vodě, nikdy se nepři se ženou"

Zdeněk Mutina (1936 - 2019)

Poděkování

Především děkuji svému školiteli **doc. PaedDr. Karlovi Jelenovi, CSc.** za odborné vedení, vstřícnost, věcné připomínky a cenné rady při tvorbě práce. Horentní poděkování **Ing. Františku Lopotovi, Ph.D.** za neuvěřitelnou trpělivost, veškeré kritické připomínky, ochotu spolupráce kdykoli a za jakýchkoli podmínek. Dále **Ing. Petru Kubovému**, který byl nedílnou součástí po stránkách komplexního technického zabezpečení, zpracování dat, ale i cenných rad, které tuto akademickou práci pomohly zkompletovat. Odborné balistické znalosti nejen v problematice střelného poranění nám byly poskytnuty konzultantem **Doc. Ing. Ludvíkem Juříčkem, Ph.D.** za které mu nesmírně děkuji. Poděkování patří i všem institucím podílející se na tvorbě komplexního balistického experimentu - Laboratoř biomechaniky extrémních zátěží FTVS - Praha, Prototypa - ZM s.r.o. - Brno, Nové Technologické výzkumné centru - Západočeské Univerzity v Plzni, Technické Univerzitě v Liberci konkrétně **Ing. Václavu Bittnerovi**. V neposlední řadě celé mé rodině a nejbližším přátelům za podporu, ilustraci vlastní obrázkové dokumentace, motivaci a již opakovaně zmiňovanou toleranci, díky které jsem mohl i přes jejich odmítání strávit svůj volný čas rozvojem a dalším badáním v oblasti balistiky. Závěrem mi dovoluje vyjádřit enormní poděkování **prof. Ing. Františku Maršíkovi, DrSc.**, který svými odbornými připomínkami, teorií termodynamiky kontinua, četnými konzultacemi a vzděláním v oblasti termomechaniky, přispěl k významnému zkvalitnění balistického experimentu.

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 zestrnutí 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

Abstract

Title: Simulation and experimental evaluation of the effects of small ammunition bullets entering a bulletproof vest

Objectives: The main objectives of the study were: parameterization of the wounding effects of bulletson artificial materials, quantification of bullet impacts using international and experimental gunshot wounding criteria, parameterization of the mechanical characteristics of polymer fibers used in bulletproof vests, objectification of the deformation effects of missiles on soft biological tissues and creating a simplified analysis of ballistic missile interaction.

Methods: In this study, experiments were performed on two artificial materials: food gelatine and glycerine soap. Calculated values and individual parameters are reported for 9 mm weapon systems. The experiments were performed in a ballistic test laboratory under standardized conditions. Data processing and parameterization of shape changes were performed using computed tomography (CT), micro-CT,ultrasound elastography and 3D scanning. Other devices used were infrared vibration spectroscopy and high-speed camera. We used the collected datato create analytical relations describing the mechanical effects ofthe material under a bulletproof vest..

Results: The area of greatest impact for the ammunition was 1.48 - 1.6 times the diameter of the projectile used. During propagation of the deformation waves through the artificial material convective waves were diminished and a sudden jump deformation occurred with a large dissipation of mechanical energy at a distance of 64.35 ± 21.45 mm under bulletproof vest. Using the maximum acceleration of the plane wave ($82.3 \text{ m}^2/\text{s}$) and the axial symmetric waves ($10.1 \text{ m}^2/\text{s}$) we are able to predict traumatic damage to soft tissues in the body.

Keywords: Wound Ballistics; Substitute Materials; Gunshot Wound Criteria, Bulletproof Vest, Missile Interactions, Deformation Wave, Traumatic Injuries

Obsah

1	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ANGLICKÝCH AKRONYMŮ	13
2	TERMINOLOGICKÝ SLOVNÍK Z OBLASTI RANIVÉ BALISTIKY	19
3	ÚVOD	26
4	VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	29
4.1	BALISTIKA	29
4.1.1	<i>Historie balistiky</i>	29
4.2	VŠEOBECNÁ BALISTIKA	30
4.3	KRIMINALISTICKÁ BALISTIKA A BIOBALISTIKA	30
4.3.1	<i>Vnitřní balistika</i>	32
4.3.2	<i>Vnější balistika</i>	32
4.3.3	<i>Přechodová balistika</i>	32
4.3.4	<i>Terminální balistika</i>	33
4.3.5	<i>Ranivá balistika</i>	33
4.3.6	<i>Postterminální balistika</i>	34
4.4	BIOBALISTIKA	34
5	PROBLÉM	35
5.1	PRÁVNÍ HLEDISKA PROBLÉMU	35
5.2	ETICKÁ HLEDISKA PROBLÉMU	36
6	STŘELA A JEJÍ ÚČINEK	38
6.1	HISTORICKÝ VÝVOJ STŘELY	38
6.2	ZÁKLADNÍ PRINCIP STŘELY	40
6.3	ENERGETICKÉ POMĚRY	40
6.4	KONSTRUKCE STŘELY	41
6.5	ZNAČENÍ STŘEL	42
6.6	CHARAKTERISTIKA PUŠKOVÝCH NÁBOJŮ	42
6.6.1	<i>Nehomogenní střely</i>	44
6.6.2	<i>Homogenní střely</i>	45
6.6.3	<i>Expanzní střely (HP, GD)</i>	45
6.7	CHARAKTERISTIKA POUŽITÉ MUNICE V EXPERIMENTU	47
6.7.1	<i>Pistolové a revolverové střelivo</i>	47
6.8	KRITÉRIÍ ÚČINNOSTI PUŠKOVÝCH STŘEL	53
6.9	SOUHRN	55
7	BALISTICKÉ TRAUMA, PRINCIPY ZRAŇOVÁNÍ TKÁNĚ	56

7.1	MECHANISMUS STŘELNÉHO PORANĚNÍ.....	56
7.2	DIFERENCIACE STŘELNÉHO PORANĚNÍ	57
7.2.1	<i>Střela</i>	57
7.2.2	<i>Poranění</i>	57
7.2.3	<i>Vstřel (místo vstupu do cíle)</i>	58
7.2.4	<i>Výstřel (místo výstupu projektilu)</i>	59
7.3	CHARAKTER STŘELNÉHO KANÁLU.....	59
7.4	VÝSLEDNÝ RANIVÝ ÚČINEK V TKÁNÍCH.....	62
7.4.1	<i>Patofysiologie střelného poranění v konkrétních živých tkáních</i>	64
7.5	LÉČBA STŘELNÝCH PORANĚNÍ.....	66
7.6	FAKTORY RANIVÉHO ÚČINKU STŘELY	67
7.7	SLOŽKY RANIVÉHO ÚČINKU	67
7.7.1	<i>Průbojný účinek</i>	68
7.7.2	<i>Tříštivý a trhavý účinek</i>	69
7.7.3	<i>Střepinový účinek</i>	70
7.8	PORANĚNÍ VZNIKLÁ RÁZOVOU VLNOU - BLAST SYNDROM	72
8	PRINCIPY OŠETŘENÍ BALISTICKÝCH PORANĚNÍ.....	74
8.1	OBEČNÁ CHARAKTERISTIKA.....	74
8.2	PRINCIPY LÉČBY BALISTICKÝCH PORANĚNÍ.....	74
8.3	EPIDEMIOLOGIE ÚRAZŮ	75
8.4	SOUHRN	76
9	ANALÝZA VĚDECKÉHO POZNÁNÍ A EXPERIMENTÁLNÍ METODY ZKOUMÁNÍ ÚČINKŮ STŘEL V DANÉ OBLASTI	77
9.1	ANALÝZA VĚDECKÉHO POZNÁNÍ.....	77
9.2	EXPERIMENTÁLNÍ METODY ZKOUMÁNÍ ÚČINKŮ STŘEL.....	78
9.2.1	<i>Postřelování umělémi materiály</i>	78
9.2.2	<i>Postřelování moderních náhradních materiálů</i>	81
9.2.3	<i>Chování střely v balistické želatíně</i>	83
9.2.4	<i>Postřelování glycerínového mýdla</i>	88
9.2.5	<i>Porovnání želatiny a glycerínového mýdla jako měřicího prostředku</i>	92
10	KRITÉRIA ZASTAVUJÍCÍHO ÚČINKU PISTOLOVÝCH A REVOLVEROVÝCH STŘEL	95
10.1	EFEKTIVNOST VERSUS EFEKT.....	95
10.1.1	<i>Hodnocení efektivity</i>	95
10.2	MEZINÁRODNĚ UZNÁVANÁ KRITÉRIA PRO MĚŘENÍ EFEKTIVNOSTI.....	96
10.2.1	<i>Stopping Power (StP)</i>	96
10.2.2	<i>Relative stopping Power (RSP)</i>	97

10.2.3	<i>Relative Energy Transmission (RET)</i>	98
10.2.4	<i>WEIGEL kritérium k hodnocení efektivnosti (W_H)</i>	98
10.2.5	<i>SELLIER kritérium k hodnocení efektivnosti (W_{TH})</i>	99
10.2.6	<i>Relative Incapacity Index (RII)</i>	100
10.2.7	<i>Power Index Rating (PIR)</i>	101
10.2.8	<i>Knockout Value „KO“ kritérium</i>	102
10.2.9	<i>One Shot Stop (OSS)</i>	102
10.2.10	<i>Shrnutí mezinárodně užívaných kritérií</i>	103
10.3	EXPERIMENTÁLNÍ KRITÉRIA	104
10.3.1	<i>Ranivý potenciál - Wounding potential (WP)</i>	105
10.3.2	<i>Ranivý účinek – Wounding Effect (WE_1)</i>	105
10.3.3	<i>Shrnutí experimentálních kritérií</i>	107
11	BALISTICKÉ OCHRANNÉ POMŮCKY	108
11.1	HISTORIE	108
11.2	VLASTNOSTI A PRINCIP BALISTICKÝCH OCHRANNÝCH POMŮCEK	109
11.3	KONSTRUKCE BALISTICKÉ VESTY	109
11.4	TŘÍDY BALISTICKÉ ODOLNOSTI.....	110
11.5	TESTOVÁNÍ BALISTICKÝCH VEST DLE PLATNOSTÍ NOREM (NIJ, ČSN)	112
11.5.1	<i>Zkouška dle ČSN 39 5360</i>	112
11.5.2	<i>Zkouška dle NIJ 0101.06</i>	113
11.6	MATERIÁLOVÉ ŘEŠENÍ BALISTICKÉ OCHRANY PROTI PROJEKTILŮM	114
11.7	POLYARAMIDOVÁ VLÁKNA.....	115
11.7.1	<i>Kevlar (USA)</i>	115
11.7.2	<i>Twaron (Holandsko)</i>	117
11.8	POLYETHYLENOVÁ VLÁKNA.....	118
11.8.1	<i>Spectra (Dyneema)</i>	118
11.9	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK TESTOVANÝCH MATERIÁLŮ.....	120
11.9.1	<i>Metodika měření</i>	120
11.9.2	<i>Popis zkoušky</i>	121
11.10	ANTIŠOKOVÁ VRSTVA - TRAUMASHIELD	123
11.11	PROBLEMATIKA POSUZOVÁNÍ ÚČINKŮ STŘELY NA ORGANISMUS ČLOVĚKA ZA OCHRANNÝM PROSTŘEDKEM	125
11.12	BEHIND ARMOUR BLUNT TRAUMA (BABT)	126
11.12.1	<i>Obecná charakteristika tupého zranění</i>	127
11.12.2	<i>Modelování BABT pomocí počítačové simulace</i>	128
12	POUŽITÉ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ A ZOBRAZOVACÍ METODY	130

12.1	BALISTICKÁ LABORATOŘ PROTOTYPA	130
12.2	POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ A MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ.....	131
12.2.1	<i>Mobilní střelecká stolice STZA 12BM1</i>	131
12.2.2	<i>Balistický uzávěr UZ-67 UNIVERSAL</i>	131
12.2.3	<i>LS-04 Doule Intelligent Light Gates</i>	132
12.2.4	<i>PTU-1 Programmable trigger unit</i>	133
12.2.5	<i>DRS-1 Doppler radar system</i>	133
12.3	UŽITÍ POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE (CT) V EXPERIMENTU	134
12.3.1	<i>Základní princip CT</i>	134
12.3.2	<i>Experimentální data</i>	135
12.4	MIKRO POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIE (MICRO-CT)	137
12.4.1	<i>Vznik a principy mikro-CT</i>	137
12.4.2	<i>Mikro-CT s vysokým rozlišením - Skyscan 1272</i>	137
12.4.3	<i>Možnosti a výstupy mikro - CT</i>	138
12.4.4	<i>Návrhy k dalšímu výzkumu v ranivé balistice pomocí CT</i>	140
12.5	3D SCANNERY	141
12.5.1	<i>HandyScan 3D 700TM</i>	141
12.5.2	<i>Využití</i>	142
12.5.3	<i>Technické parametry</i>	142
12.5.4	<i>Software dokumentace experimentální munice</i>	143
12.6	ELASTOGRAFIE.....	145
12.6.1	<i>Mechanické vlastnosti látek</i>	145
12.6.2	<i>Ultrazvuková elastografie</i>	148
12.7	VLASTNÍ EXPERIMENTÁLNÍ DATA	151
13	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	153
14	PARAMETRIZACE VZNIKLÉ KAVERNY V NÁHRADNÍCH MATERIÁLECH PŘI POUŽITÍ EXPERIMENTÁLNÍ MUNICE	154
14.1	ÚVOD	154
14.2	CÍL EXPERIMENTU	156
14.3	BALISTICKÁ CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTU	157
14.4	DÍLČÍ VÝSLEDKY	158
14.4.1	<i>Náboj LUGER 9mm - FMJ</i>	159
14.4.2	<i>Náboj MAGNUM .357 – FMJ</i>	160
14.4.3	<i>Náboj MAGNUM .357 – GOLD DOT</i>	160
14.5	DÍLČÍ DISKUZE.....	165
14.6	DÍLČÍ SHRUTÍ.....	166

15	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK POLYMERNÍCH VLÁKEN.....	167
15.1	ÚVODEM.....	167
15.2	POPIS PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES A METODIKA MĚŘENÍ.....	167
15.3	ZATĚŽOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES A POPIS EXPERIMENTU	168
15.4	MIKROSKOPIE A FOTODOKUMENTACE	171
15.5	DÍLČÍ SHRNUÍ.....	171
16	TEORIE RÁZU VE VISKOELASTICKÉM KONTINUU	173
16.1	ÚVOD	173
16.1.1	<i>Materiálové vztahy</i>	<i>173</i>
16.1.2	<i>Tenzor konečných deformací.....</i>	<i>174</i>
16.1.3	<i>Tenzor rychlosti deformace a tenzor malých deformací.....</i>	<i>178</i>
16.1.4	<i>Experimentální stanovení deformací.....</i>	<i>179</i>
16.2	BILANCE HYBNOSTI, MOMENTU HYBNOSTI A MECHANICKÉ ENERGIE.....	180
16.2.1	<i>Koeficient restituce a ztráta kinetické energie</i>	<i>183</i>
16.3	CÍL EXPERIMENTU	184
16.4	CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTU A JEHO VYHODNOCENÍ.....	185
16.5	INTERAKCE PROJEKTILU S OCHRANNÝM ŠTÍTEM	191
16.5.1	<i>Materiálový model tělesa s ochranným štítem a projektilu</i>	<i>192</i>
16.5.2	<i>Kontaktní síla při nárazu a velikost průniku</i>	<i>195</i>
16.5.3	<i>Elastické vlastnosti tělesa sendvičového typu</i>	<i>197</i>
16.5.4	<i>Odezva tělesa a projektilu v okamžiku kontaktu.....</i>	<i>199</i>
16.6	ŠÍŘENÍ DEFORMAČNÍ VLNY OD MÍSTA KONTAKTU.....	206
16.7	ŠÍŘENÍ DEFORMAČNÍCH A NAPĚŤOVÝCH VLN VE VISKOELASTICKÉM TĚLESE.....	208
16.7.1	<i>Šíření slabých deformačních poruch ve viskoelastickém tělese.....</i>	<i>210</i>
16.7.2	<i>Útlum deformační poruchy viskozitou- analytické řešení.....</i>	<i>211</i>
16.7.3	<i>Útlum deformační poruchy viskozitou - numerické řešení</i>	<i>218</i>
16.8	ŠÍŘENÍ DEFORMAČNÍCH PORUCH KONEČNÉ AMPLITUDY - LINEARIZOVANÝ KONVEKTIVNÍ ČLEN.....	220
16.8.1	<i>Šíření deformačních poruch konečné amplitudy - lineární teorie</i>	<i>221</i>
16.8.2	<i>Šíření deformačních poruch konečné amplitudy - postupná vlna.....</i>	<i>223</i>
16.9	DÍLČÍ DISKUZE.....	227
16.10	DÍLČÍ SHRNUÍ.....	231
17	ZÁVĚR.....	239
18	SEZNAM PŘÍLOH	244
19	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	245
20	SEZNAM TABULEK	252

21	SEZNAM GRAFŮ.....	253
22	DOSTUPNÁ LITERATURA	254

1 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ANGLICKÝCH AKRONYMŮ

A	cross-sectional area - příčný průřez
A_p	příčný průřez projektilu
A_B	příčný průřez tělesa - balistické želatiny
α	koeficient teplotní roztažnosti
a_0	tloušťka zkušební tělesa
A_{50}	poměrné prodloužení v procentech počáteční délky - tažnost
A_t (corr.)	prodloužení zkušební tělesa po korekci - tažnost
ABC	Airways, Breathing, Circulation (základní postup při resuscitaci)
AČR	Armáda České republiky
ACC	Accelerator
AP	Armor Piercing
ATLS	Advanced Trauma Life Support
B index	Body - soustava (těleso)
b_0	šířka zkušební tělesa
BABT	Behind Armour Blunt Trauma
BATLS	Battlefield Trauma Life Support
BCT	Blunt Chest Trauma
BSA	Body Surface Area
c	rychlost šíření zvuku
c_l	rychlost podélných elastických vln
c_f	fázová rychlost
c_g	grupová rychlost
C_p	průřezové zatížení střely
CC	Casualty Criterion - kriteria ranivosti
CCCC	Combat Casualty Care Course
CAD	Computer-Aided Design – digitální model pro design, strojírenství a výrobu
CAE	Computer-Aided Engineering – digitální simulace výkonu objektu a sestav
CAI	Computer-Aided Inspection – počítačová kontrola naskenovaného výrobku
C.I.P.	Český úřad pro zkoušení zbraní a střeliva
C/L	objem dutiny v hlině podle Caranta a Legraina
CL	Core-Lokt – Lovecká střela vyvinutá firmou Remington
CN	Conical Nose – rotační střela
CNS	centrální nervová soustava
CNTM	Centrum Nových Technologií a Materiálů
CSF	cerebrospinální tekutina
ČSN	Česká státní norma

CSU	Casualty Staging Unit
CT	Computed Tomography - počítačová tomografie
d	průměr projektilu
d_p	průměr projektilu
d_{pef}	efektivní průměr projektilu
D	průměr efektivní deformace
D_p	velikost ráže střely reprezentovaná číslem ráže (rozsah ráží pro PIR)
D_{IN}	průměr vstupní kaverny
D_{OUT}	průměr výstupní kaverny
D_{MAX}	maximální průměr kaverny
DC	dýchací cesty
DICOM	software na zpracování dat z CT
DRS	Doppler Radar System
E	Youngův modul pružnosti (elasticita tkání)
$e_{(1)}$	změna velikosti objemu při deformaci
$e^{(o)}$	
e^{ij}	tenzor konečných deformací
ε_{eng}	inženýrské (Cauchyho) napětí
ε_{Eul}	Eulerovo (Eulerovo - Almaziho) napětí
ε_{res}	koeficient restituce
$\dot{\varepsilon}$	rychlost deformace
E_B	Elastický modul - je určen elastickým modulem tělesa (lidského těla)
E_c	celková elasticita
E_d	dopadová energie střely
E_g	elasticita želatiny
E_o	počáteční energie
E_{ps}	elasticita ochranného štítu
E_{PŘ}	předaná kinetická energie
E_{kin} (W_{kin})	vstupní kinetická energie
E_{kex}	výstupní kinetická energie
EKG	Elektrokardiogram
EU	Evropská Unie
ET	součinitel využití kinetické energie střely v cíli
f	form factor
F_m	síla na mezi pevnosti v tahu
F_c	kontaktní síla dvou těles
FEA	Finite-Element Analysis; digitální proces
FP	Flat Point
FMJ	Full Metal Jacket (celokovový plášť)
FMJ-FP	celoplášťovou střelou s olověným jádrem

FMJ-P	celoplášťovaná ogivální střela
FMJ-RN	celoplášťovaná ogivální střela se zakulacenou špičkou
FN	Flat Nose
FST	Forward Surgical Team
F.W.	Front Wave
g	gravitační zrychlení
γ	elastický koeficient konečných poruch
g index	gelatine - náhradní materiál balistická želatina
GD	Gold Dot – expanzní střela vyvinuta firmou CCI-Speer
GM	glycerinové mýdlo
HP	Hollow Point - vysoce expanzní střela - tzv. střela s dutinkou - DUM-DUM
HPJ	High Performance Jacketed
I	impuls síly
IVP	intravaskulární prostor
ICRC	International Committee of the Red Cross - Mezinárodní Červený kříž
J	Jacketed – oplášťovaná střela
JHP	Jacketed Hollow Point – poloplášťová střela s expanzní dutinou v přední části
JFP	Jacketed Flat Point – varianta střely SP, ale její špička má plochý tvar
JIP	Jednotka intenzivní péče
κ	modul stlačitelnosti
k	multiplikační konstanta
k_1	převodní součinitel do soustavy
k_2	empiricky stanovený součinitel
k_x	vlnový vektor
KO	Knockout Value - kritérium podle Taylora
KPCR	Kardio-pulmo-cerebrální resuscitace
l	délka projektilu
L	Lead – olověná střela
Lc	pracovní oblasti zkušebních těles
L_0	je součet tloušťky tělesa a tloušťky ochranného štítu
L_{MP}	délku závěsu tělesa
LLW	Less than Lethal Weapon
LSWC	Lead Semi-Wadcutter – olověná střela typu Wadcutter s tupou špičkou
LRN	Lead Round Nose - olověná střela s oblou špičkou - pokrytá vrstvou plastu
LWC	Lead Wadcutter - neplášťovaná válcová terčová střela prosekávací, olověná
$m_{p(q)}$	hmotnost projektilu
MB	Mračno bodů - oblak bodů v 3D prostoru reprezentovaný souřadnicemi X,Y,Z
MP	těleso zavěšeno v těžišti - Mass Point
micro-CT	micro-computed tomography - mikro CT
MKP	metoda konečných prvků
MRS	malorážové střelivo
M.W.	Max. Wave

N	počet případů, v nichž byl tento náboj použit a zaveden do hodnocení
η	dynamická viskozita
n_c	vnější normála
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
NIJ	National Institute of Justice
NIST	National Institute of Standards and Technology
NLMVH	National Library of Medicine's Visible Human
NLW	Non-Lethal Weapon
NM	náhradní materiál
NTVC	Nové Technologické Výzkumné Centrum
NURBS	Non-Uniform Rational Basis Spline
σ	Poissonovo číslo
θ_0	amplituda kmitu (maximální výchylka)
OSN	Organizace spojených národů
OSS	One Shot Stop
OSSR	One Shot Stop Ratio
ρ	hustota prostředí
p_c	velikost kontaktní síly
p_{el}	elastické napětí
p_{dis}	disipativní napětí
ps index	Protection Shield - balistická vesta
+P	náboje se zvýšeným tlakem plynů
PA	penetration ability - míra penetrace
PASGT	Personal Armor System for Ground Troops
PB	Lead Bullet – celoolověná střela
PHTLS	Prehospital Trauma Life Support
PIR	Power Index Rating podle Matunase
PL	plastelína
PNO	pneumothorax
PP 75/25	Petrolát - Parafín
PPTA	para-fenylentereftal amid
PS	polygonová síť – výstup ze samo-polohovacích 3D skenerů
PSP	poloplášťovaná ogivální střela
PTU-1	Programmable Trigger Unit
R_m	meze pevnosti v tahu
RET	Relative Energy Transmission
RII	Relative Incapacity Index
RN	Round Nose – ogivální špička střely
RNU	relativní nekapacitní ukazatel
RSP	Relative Stopping Power podle Hatcherera
RTG	rentgen
S	příčný průřez střely

S₀	průřez zkušebního tělesa
S&B	Sellier & Bellot, Vlašim, ČR
SCHP	střela je tvořena jedním kusem mědi
SD	hustota průřezu
SJSP	semijacketed soft point – flat – poloplášťová střela s plochou špičkou
SK	střelný kanál
SO	směrodatná odchylka
SP	poloplášťová s měkkou špičkou Soft Point
SP-FM	poloplášťovaná střela s plochou přední částí
STANAG	STANdardization AGreement v NATO
StP	Stopping Power podle Hatchera
ST	Silver-Tip
STL	StereoLithography – formát zápisu polygonové sítě
SWC	Semi-Wadcuetter, polo-plášťová střela
T	teplota
τ	doba jedné periody kmitu
T_(n)	povrchová síla působící na plochu
TC	Truncated Cone – označuje tvar střely
TRI	Triangulace - způsob zjišťování souřadnic a vzdáleností
TRTS	Triage Revised Trauma Score
μ	koeficient smykové viskozity
$\hat{\mu}$	modul pružnosti ve smyku
μ_B, μ_p	viskozita interagujících těles
μ_c	celková vizkozita
μ_{cr}	mez kluzu
u_{xi}	maximální výchylka testovacího (materiálového) bodu
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene - vysokomolekulární polyetylen
v	koeficient kinematické viskozity
V	objem střelného kanálu
v_c	maximální rychlost kontaktní plochy
v_{ct}	rychlost kuželové deformační vlny
v_p	rychlost střely
v_s	rychlosti šíření střížných vln
v_{B (b)}	dopadové rychlosti střely v cílu (body - tělo)
v_d	dopadová rychlost střely
v_{xi}	rychlost vlny z rychlosti postupu maxima výchylky
v_{MP}	těžišťová rychlost soustavy těleso + projektil
v_{x(x,t)}	šíření podélné rychlostní vlny
v_{0max}	maximální rychlost za balistickou pomůckou
V_B	objem dopadajícího projektilu

∂V_p	povrch dopadajícího projektilu
∂V	doba interakce střely s povrchem tělesa
V_{BG}	celkový objem dutiny v glycerinovém mýdle
V_{cav}	objem trvalé dutiny
V_{def}	deformace vytěsněného objemu
v_{lim}	limitní rychlost střely
ω	úhlová frekvence
W_H	kritérium účinnosti podle Weigela
W_{TH}	kritérium účinnosti podle Selliera
WB	Wound Ballistics - ranivá (vulnerativní, traumatická) balistika
WE	Wounding Effectivnes - ranivý účinek
WC	WadCutter – speciální střely určené pro střelbu do papírových terčů
WP	Wounding Potential - ranivý potenciál
X	materiálový bod
x_{max}	maximální hloubka průhybu balistické vesty
x_{distor}	maximální výchylka - vystavení tkáně nejvyšším silovým účinkům
ZČUP	Západočeská Univerzita v Plzni
Ž-20	balistická želatina 20 % roztok
Ž-10	balistická želatina 10 % roztok

2 TERMINOLOGICKÝ SLOVNÍK Z OBLASTI RANIVÉ BALISTIKY

dle Klein & Ferko, 2004; Komenda, 2006; Kneubuehl, 2011; Juříček, 2013, 2017

balistická křivka - prostorová křivka, po níž se pohybuje střela v atmosféře po opuštění pevného vedení (hlavně nebo raketnice). Tvar dráhy klasické střely závisí zejména na fyzikálních vlastnostech atmosféry (tlak, teplota a vlhkost vzduchu, příp. směr a rychlost větru) a balistických charakteristikách střely (počáteční rychlost, úhel výstřelu a balistický koeficient). Po balistické křivce se po shozu z letounu pohybují i letecké pumy.

balistický koeficient c - charakteristika letových vlastností střely v atmosféře, která vyjadřuje vliv vnějšího tvaru, ráže d a hmotnost střely m_p na velikost odporu vzduchu, působícího na střelu za letu.

balistická ochrana - umělý překážka, která je součástí cíle a jejímž účelem je chránit cíl (techniku, člověka) proti ničivým účinkům munice (zejména střel a střepin). K balistickým ochranám se řadí ochranné oděvy, přilby, štíty, pancíře apod. Balistické ochrany mohou být pasivní (tvoří pouze mechanickou překážku) a aktivní, uvolňující při pronikání ničivého elementu energii, která se využije k jeho zachycení (např. balistické ochrany s trhavinou).

balistický výkon – ukazatel balistických možností určitého zbraňového systému definovaný počáteční energií střely E_o . S rostoucím balistickým výkonem roste zpravidla i ranivý potenciál střely.

balistika – nauka o pohybu střely. Analyzuje pohyb střely v hlavní (balistika vnitřní), před hlavní v pásmu dodatečného účinku prachových plynů (přechodová), na dráze letu k cíli (vnější) a při pronikání cílem (koncová, terminální, cílová). Specifickým odvětvím koncové balistiky je ranivá balistika.

biobalistika - viz *ranivá balistika*.

bioogivální střely - střela, jejíž vnější tvar charakterizuje přední a zadní ogivál, případně i válcová část jejího těla. Bioogivální střela se vyznačuje velmi dobrými letovými vlastnostmi. Typickými bioogiválními střelami jsou rotačně stabilizované puškové střely pro výkonné ruční zbraně.

cíl – objekt, který je vystaven ničivým účinkům střel nebo střepin. V oblasti ranivé balistiky jsou analyzovány účinky na živé cíle nebo jejich náhrady (substituce).

celoplášťova střela - viz *plášťová střela*.

debridement – odstranění nekrotické nebo infikované tkáně (excizí a incizí) v rámci nezbytného chirurgického zákroku po střelném poranění; pojmem debridement je také označ. množství nekrotické tkáně, kterou je třeba odstranit excizí.

destabilizace střely – ztráta stability střely při pronikání cílem. Destabilizace je základní podmínkou dosažení požadované úrovně ranivosti u střel, které nepodléhají funkční deformaci (např. vojenské celoplášťové střely). Měřítkem destabilizace je např. délka počátečního přímého úseku střelného kanálu.

dočasná dutina – viz *střelný kanál*.

dopadová energie – kinetická energie postupného pohybu střely při jejím dopadu na povrch cíle

dostřel - vodorovná vzdálenost bodu výstřelu od bodu doletu. U střelných zbraní pro přímou střelbu se jejich efektivní dosah udává velikost účinného dostřelu, u zbraní pro nepřímou střelbu velikostí maximálního dostřelu.

dráha střely - křivka, kterou opisuje těžiště střely při pohybu v prostoru po opuštění hlavně nebo raketnice. V atmosféře je dráhou střely balistická křivka, při pohybu ve vakuu se střela pohybuje po některé z kuželoseček, v závislosti na počátečních balistických podmínkách a charakteru uvažovaného tíhového, resp. gravitačního pole.

Dum-Dum – historický typ zplošťující se nebo rozšiřující (tj. expanzivní) střely, používané v koloniálních válkách ve 2. polovině 19. století (použití střeliva typu Dum-Dum pro vojenské účely bylo zakázáno první Haagskou deklarací v r. 1899).

energetické zatížení průřezu střely – viz *měrná energie střely (hustota energie)*.

excize – odstranění řezem nefunkční (obvykle nekrotické) tkáně v okolí střelného kanálu.

expanzivní střela – střela, jejíž konstrukce umožňuje dosáhnout při pronikání tkání živého cíle radiální deformace (rozšíření a zploštění), čímž se zvýší úroveň předané energie i dosažený zastavující účinek.

experimentální balistika – větev balistiky zabývající se pokusným ověřováním teoretických závěrů a přímým stanovením balistických charakteristik měřením. Základním druhem experimentu v oblasti balistiky je experiment spojený se střelbou.

grain - jednotka užívaná k měření hmotnosti střel a střelného prachu v angloamerických zemích ($1 \text{ grain} = 64,79891 \text{ mg}$).

hlaveň - část palné zbraně, v níž dochází k urychlení střely - vzniku kinetické energie střely přeměnou tepelné energie plynů, vzniklých hořením střeliviny, hlavně plní zároveň vodící funkci ve vztahu ke střele (navádí střelu na cíl).

hydrodynamický efekt - radiální šíření (přenos) tlakové vlny tekutým prostředím dutých orgánů v důsledku předání kinetické energie střely do okolí, s následným poškozením vzdálených tkáňových struktur.

incize – rozříznutí tkáně (např. pro zjištění závažnosti střelného poranění s využitím kritéria 4C).

koncová balistika – nauka o pohybu střely v cíli. Podle typu cíle rozlišujeme koncovou balistiku živých (měkkých) cílů (ranivá balistika) a koncovou balistiku tvrdých cílů.

kriminalistická balistika – odvětví balistiky zabývající se analýzou pohybu střel a funkčních změn na nich v souvislosti s vyhledáváním, zajišťováním, zkoumáním a vyhodnocováním důkazů o použití střelných zbraních a posuzováním specifických otázek balistiky z hlediska potřeb kriminalistiky.

kritérium 4C – lékařské kritérium pro stanovení hranice oblasti pro excizi (odstranění řezem) devitalizované tkáně po střelném poranění. Přitom je nutné brát v úvahu:

- Contraction – kontrakci svalu (reakce na mechanický podnět, např. pinzetou),
- Consistency – struktura (konzistence) tkáně je normální (není voskovitá nebo podobná vařenému masu),
- Capillary bleeding – kapilární krvácení na řezu,
- Color – červená barva tkáně (ne hnědá nebo bledá, která charakterizuje tkáň nekrotickou).

Pokud tkáň obnažená předchozí excizí splňuje všechny čtyři body, lze ji považovat za zdravou, resp. životaschopnou (nevyžadující další excizi).

limitní rychlost střely - nejmenší dopadová rychlost střely zabezpečující její pronik neživým cílem definovaných vlastností.

lovecká balistika – odvětví civilní balistiky, které analyzuje pohyb střely v souvislosti s loveckými aplikacemi. Lovcům dává zejm. podklady pro správné zamíření zbraně na cíl i pro optimální výběr zbraně s ohledem na její dosah a ranivý (smrtící) účinek na určitý druh lovené zvěře.

Machovo číslo M - bezrozměrné číslo definované poměrem rychlosti střely a rychlosti zvuku ve vzduchu (obecně v médiu, ve kterém pohyb těsa probíhá).

malorážové střelivo - druh střeliva pro malorážové zbraně ráže od 6 do 20 mm. Tento pojem se používá především u vojenského střeliva. K typickým představitelům malorážového střeliva patří vojenské puškové střelivo ráže 7.62 mm.

mechanická střelná zbraň - střelná zbraň, u které je funkce odvozena od okamžitého uvolnění nahromaděné mechanické energie.

měrná energie - absolutní kinetická energie střely nebo střepiny vztažená na jednotku plochy jejího příčného průřezu při proniku cílem.

mezinárodní úmluvy – právní akty mezinárodního válečného práva, které omezují bojové použití systémů s výrazně nehumánními účinky.

mortalita – viz *smrtnost*

munice - technické resp. bojové prostředky s náplní výbušnin. Hlavní částí muničního celku je obvykle tělo munice, účinná náplň a iniciátor. K hlavním druhům munice se řadí střelivo, ruční granáty, letecké pumy, torpéda, ženijní miny, pyrotechnické prostředky. Podle určení munice se dělí na ostrou, cvičnou, školní a náhradní.

náboj - samostatný muniční celek, tvořený obvykle střelou, vymetenou prachovou náplní, iniciátorem a nábojnicí, určený ke střelbě z palné zbraně. Podle druhu ruční palné zbraně se náboje rozlišují na pistolové, revolverové a puškové.

nekrotická (odumřelá) tkáň – tkáň v okolí střelného kanálu, u níž došlo v důsledku mechanického a hydrodynamického účinku pronikající střely k nevratné ztrátě vitálních funkcí v důsledku přerušení cévních vazeb s organismem. K nekróze tkání pak dochází v důsledku nedostatku kyslíku.

neletální střelivo – střelivo určené ke střelbě na živé cíle, u něhož je prioritní zastavující účinek s absencí vážného poškození zdraví při vyloučení smrtelných následků.

oblast trvalého poškození tkáně – viz *zóna traumatické nekrózy*.

oblast trvalého poškození tkáně - viz *zóna (molekulárního) otřesu*.

ogivál - rotačně symetrická část vnějšího povrchu těla střely s proměnným průřezem, vytvořená rotací oblouku kružnice (popř. více kružnic), křivky s proměnlivým poloměrem křivosti nebo přímky kolem podélné osy symetrie střely.

patologie – nauka o chorobných změnách probíhajících v organismu v souvislosti se střelným poraněním.

pistole - krátká palná zbraň, která se od revolveru liší tím, že nemá náboje uloženy ve válci, ale ve schránkovém zásobníku. Automatická činnost mechanismů zajišťuje vyšší rychlost střelby.

plášťová (plášťovaná) střela - střela, jejímž základním konstrukčním prvkem je tenkostěnný (obvykle mosazný) plášť. Plášťové střely mohou být celoplášťové (vnější povrch je zcela krytý pláštěm), nebo poloplášťové (u nich je obvykle nekryta pláštěm přední část střely).

počáteční rychlost střely - maximální rychlost střely vystřelené ze střelné zbraně na počátku dráhy letu při opuštění pevného vedení. U hlavních palných zbraní je počáteční rychlost teoretická (smluvní) rychlost, kterou by musela mít na ústí hlavně střela neurychlená vytékajícími plyny, aby měla na konci pásma dodatečného účinku prachových plynů stejnou rychlost jako střela, která byla vytékajícími plyny urychlena.

poměrná předaná energie – poměr mezi předanou a dopadovou energií střely vyjádřený v procentech.

porážející účinek – viz *zastavující účinek*

postřel – střelné poranění se střelným kanálem probíhajícím otevřeně na povrchu těla nebo orgánu (zkušební bloku).

průbojnost - schopnost průbojné střely pronikat pancířem nebo jinou překázkou (balistickou ochranou) s využitím dopadové kinetické energie ničivého prvku (střely, průbojného jádra). Průbojnost se udává zpravidla v násobcích ráže střely.

průbojný účinek střely - ničivý účinek střely, spočívající v proniku překážek (balistických ochranných) střelami, nebo jinými balistickými tělesy, s využitím dopadové kinetické energie.

průřezové zatížení střely - konstrukční charakteristika střely, určená jako poměr hmotnosti střely m_p a plochy jejího příčného průřezu S .

průstřel – střelné poranění charakteristické úplným pronikem střely tělem nebo orgánem (zkušebním blokem). Střelný kanál je v případě průstřelu ohraničen vstřelem a výstřelem.

předaná energie – rozdíl mezi dopadovou a zbytkovou energií střely po proniku cílem (tělem, orgánem).

přechodová balistika - nauka o pohybu střely při přechodu z pevného vedení (hlavně, raketnice) do atmosféry. Přechodová balistika hlavních palných zbraní analyzuje jevy, související s výtokem plynů z hlavně a jejich působením na střelu.

ranivá balistika – odvětví koncové balistiky, které analyzuje pohyb a chování střel v tkáních živého cíle v souvislosti se vznikem střelného poranění.

ranivost – schopnost střely dosáhnout požadované (předpokládané) úrovně ranivého účinku při zásahu živého cíle.

ranivý potenciál střely – charakteristika ranivé schopnosti střely kvantitativně určená velikostí dopadové energie. Výsledná úroveň ranivého účinku střely však závisí nejen na ranivém potenciálu, ale i na schopnosti střely tento potenciál využít.

ranivý účinek – ničivý účinek střely na živý cíl, jehož výsledkem je vznik střelného poranění.

raný kanál – viz *střelný kanál*

ráže - identifikační charakteristika určitého druhu střeliva určeného pro hlavnovou palnou zbraň. Je tvořena souborem údajů, které specifikují ráži střely, konstrukci náboje, popř. i jeho určení, použitelnost apod.

ráže střely - smluvní údaj přibližně odpovídající maximálnímu vnějšímu průměru střely (vodící část).

sekundární střela – těleso vytvořené nebo urychlené pronikající střelou a zvyšující její ranivý účinek.

smrtící účinek – nejvyšší stupeň ranivého účinku, který již nelze rozchodit. Smrtící účinek je preferován pouze u loveckého střeliva.

smrtnost (mortalita) – relativní číslo definované jako poměr počtu usmrcených osob a celkového počtu osob s indikovaným střelným poraněním určitého typu.

soudní balistika – viz *kriminalistická balistika*.

stabilita střely - schopnost střely pohybovat se po dráze letu bez výraznějšího odchýlení své podélné osy od tečny ke dráze. Stabilita se zajišťuje buď uvedením střely

do rotačního pohybu kolem podélné osy (rotační střely) nebo umístěním vhodných odporových ploch na zadní část střely.

střela – těleso vhodného tvaru a konstrukce, určené ke střelbě ze střelné zbraně za účelem zasažení cíle a vyvolání ranivého nebo zastavujícího účinku. Nejčastěji jsou používány střely jednotné, tvořené jedním kompaktním homogenním (olověným, mosazným, plastovým, pryžovým aj.) nebo nehomogenním (složeným) tělesem. Méně často se používají střely hromadné, tvořené větším množstvím drobných těles (nejčastěji broků). Nejvyššího stupně ranivého účinku se obecně dosahuje se střelami expanzivními.

střepina – ničivý prvek munice tříštivého typu, vytvořený rozkladem těla munice při detonaci její trhavinové náplně. Podle principu vzniku a charakteristického tvaru se střepiny dělí na střepiny nepravidelného tvaru vzniklé náhodným rozkladem těla s střepiny vytvořené řízeným rozkladem těla (přetvarované, nebo zcela vytvarované střepiny pravidelného tvaru).

střelné poranění – poranění způsobené živému cíli dopadající a příp. pronikající střelou nebo střepinou. Podle charakteru střelného kanálu se rozlišují průstřely, zástřely a postřely.

střelný kanál – dutina vytvořená ve tkáni (náhradním materiálu) pronikající střelou. V okamžiku pronikání vzniká dočasná dutina, po proniku a ustálení děje trvalá (permanentní) dutina. Střelný kanál je charakteristický tvarem (přímý, křivočarý, větvený), velikostí (objemem) a také parametry vstřelu a výstřelu.

teoretická balistika - větev balistiky, která se zabývá teoretickou analýzou pohybu střel, nejčastěji s využitím vhodného matematického modelu.

traumatikální balistika – viz *ranivá balistika*

trvalá dutina – viz *střelný kanál*

úst'ová energie - energie střely v okamžiku opuštění ústí hlavně.

úst'ová rychlost - relativní rychlost střely vzhledem k hlavní palné nebo plynové zbraně v okamžiku opuštění jejího ústí. Je odlišná od počáteční rychlosti střely.

vnější balistika - nauka o pohybu střely a atmosféře během letu k cíli. Vnější balistika se zabývá otázkami pohybu střel po balistických dráhách, stabilitou i pravidelností letu střel a přesností střelby.

vnitřní balistika - nauka o pohybu střely uvnitř hlavně palné zbraně při výstřelu. Vnitřní balistika se zabývá otázkami spojenými s hořením střelivin a tlakovými poměry ve vnitřním prostoru hlavně i kinematikou pohybu střelivin.

vstřel – okraj střelného kanálu, jímž střela vstoupila do tkáně (zkušební bloku).

výstřel – okraj střelného kanálu, jímž střela po průstřelu opustila tkáň (zkušební blok).

vojenská balistika – odvětví balistiky, které analyzuje pohyb střel v souvislosti s vojenskými aplikacemi.

vulnerabilní balistika – viz *ranivá balistika*.

zastavující (zastavovací) účinek - paralyzující účinek střely na živý cíl, spočívá ve výrazném omezení aktivit zasaženého živého organismu bez ohledu na způsobená střelná poranění.

zástřel – střelné poranění, při němž nedošlo k úplnému proniku střely tělem, orgánem (zkušebním blokem). Střelný kanál při zástřelu končí v hloubce tkáně, v níž střela uvízla.

zóna traumatické nekrózy (zóna kontuze) – nevratně poškozená oblast v okolí střelného kanálu tvořená nekrotickými tkáněmi.

zóna (molekulárního) otřesu – okrajová zóna vzdálenější od střelného kanálu, tvořená poškozenými tkáněmi se schopností regenerace. Pro tuto zónu jsou charakteristická krvácení mezi svalovými vlákny a otoky buněk.

zbytková energie - kinetická energie střely nebo její části po proniku živým cílem, orgánem nebo zkušebním blokem.

živá síla – smluvní pojmenování vojenského živého cíle typu člověk.

3 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 nejrůznějších **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 konvečních 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 přeneso 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.

4 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

4.1 Balistika

Slovo balistika je řeckého původu. Označuje vědeckou disciplínu, jejichž předmětem zkoumání jsou dráhy letu vržených těles. V souvislosti s rozšířením palných zbraní se z balistiky stala věda, která zkoumá všechny děje a jevy, související s pohybem střely a jejích částí (Kneubuehl, 2004).

4.1.1 Historie balistiky

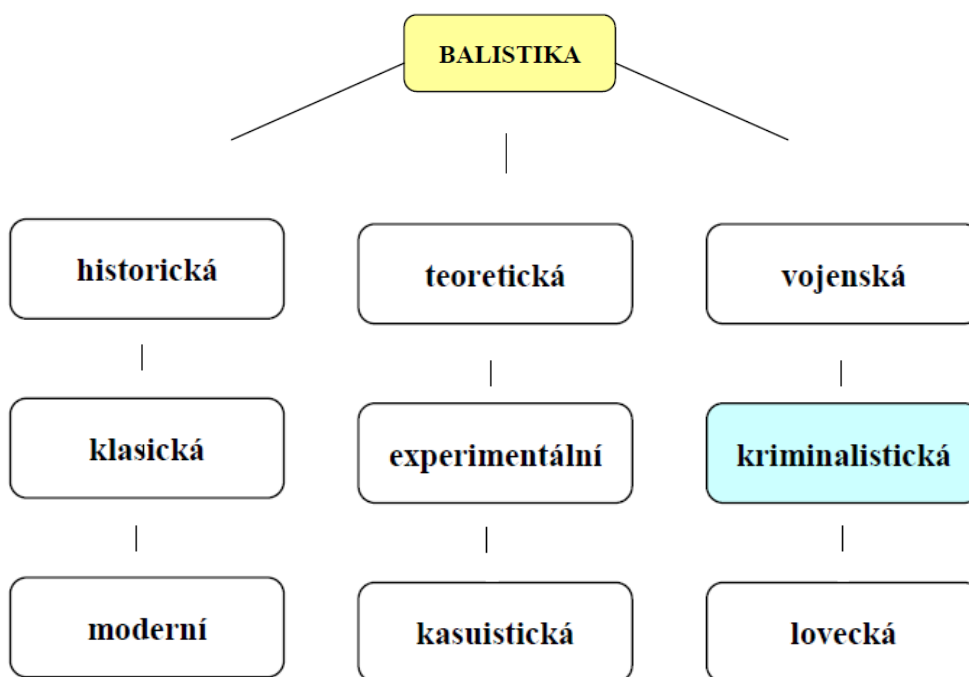
Věda o pohybu střely. První střelná poranění vznikla již v pravěku v rámci použití prvních typů mechanických střelných zbraní, zejména luků. Teprve ve 13. století se začínají na bojišti objevovat první palné zbraně. Ranivé účinky ručních palných zbraní byly výrazně vyšší vzhledem k větší dopadové energii střel ve srovnání se střelami vystřelenými z mechanické zbraně. Svoje začátky má ve starověku. První teoretická balistická bádání byla – jak původní význam slova napovídá – zasvěcena vrhu těles. Jejich autory byli Leonardo da Vinci v 15. a Galileo Galilei v 16. Století (Kneubuehl, 2004).

Za zakladatele teoretické balistiky je pokládán švýcarský matematik a fyzik Leonard Euler (1707 - 1783). V 18. století se uskutečnila první měření počáteční rychlosti střely pomocí balistického kyvadla. V 19. století byly zformulovány první rovnice, které představovaly teoretický popis vnitrobalistických dějů.

V odborné literatuře se lze setkat s různým druhem třídění podle různých kritérií, například: Balistika historická, klasická, moderní, teoretická, experimentální, kasuistická, vojenská, hlavňových zbraní, balistika raket, kriminalistická, forenzní, ranivá, lovecká, sportovní (Kneubuehl, 2004).

4.2 Všeobecná balistika

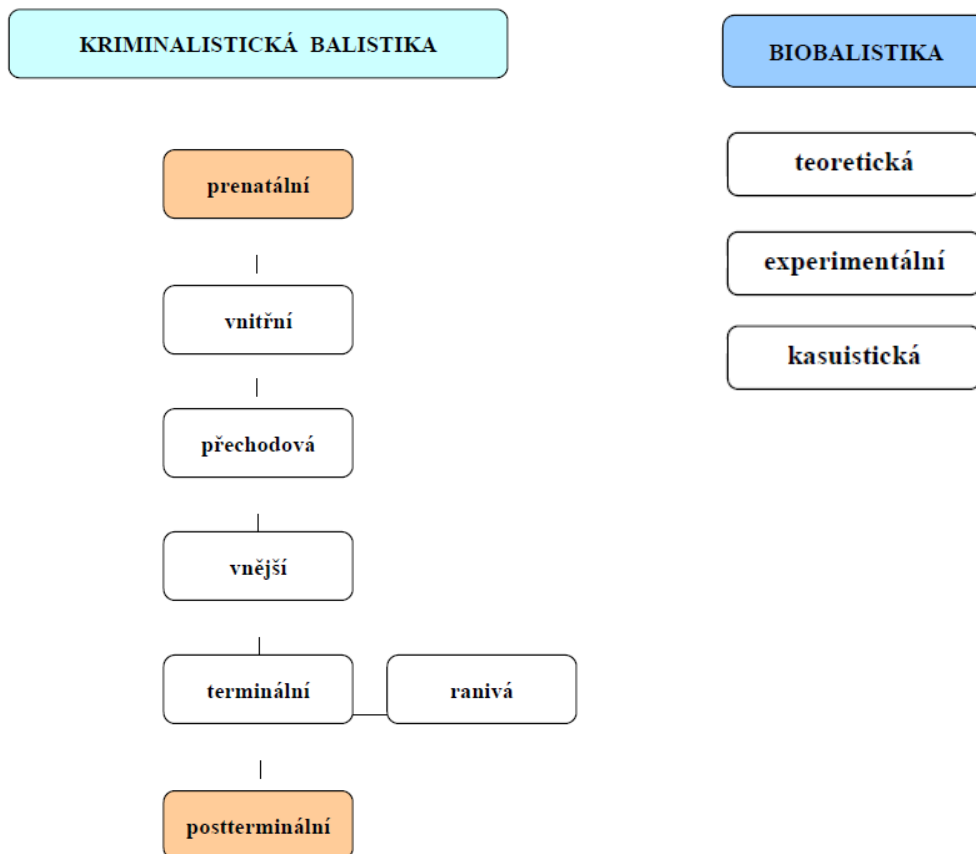
Nauka o zákonitostech pohybu střel při střelbě, je technická vědní disciplína, která se zabývá jevy probíhajícími při výstřelu, sleduje a řeší úkoly spojené s pohybem (letem) střely a jejich částí (např. střepin, jader těl střel, apod.) ve vzduchu či jiném prostředí a balistickými jevy, které s pohybem střely úzce souvisí (přesnost střelby a účinek střely v cíli), (Planka, 2010).



Obr. 1. Obecné členění všeobecné balistiky (Planka, 2010)

4.3 Kriminalistická balistika a biobalistika

se zabývá zkoumáním objektů a případně dat, které mají vztah ke střelbě nebo jinému použití zbraně pachatelem trestného činu. Jedná se o interdisciplinární vědu, která disponuje teoretickými, metodickými i znalostními prostředky z mnoho klasických vědních a průmyslových oborů. Kriminalistická balistika disponuje mnoha vlastními vědeckými metodami, s jejichž pomocí řeší specifické kriminalistické otázky.



Obr. 2 Třídění kriminalistické balistiky a biobalistiky (Planka, 2010)

V souvislosti s palnými (hlavnými) zbraněmi rozlišujeme balistiku dle Planka, (2010):

- **vnitřní**, která zkoumá pohyb střely v hlavní a zákonitosti jevů a procesů probíhajících při výstřelu
- **přechodovou**, která se zabývá pohybem střely bezprostředně po opuštění hlavně a jevy s tím souvisejícími
- **vnější**, jež studuje pohyb střely v atmosféře během letu na cíl a zabývá se výpočtem drah střel, stabilitou letu a přesností střelby
- **koncová**, která analyzuje pohyb střely v cíli (překážce)

4.3.1 Vnitřní balistika

Vnitřní balistika **studuje děj výstřelu**, při kterém dochází k hoření střeliviny v hlavni a k urychlení – vymetení střely tlakem spalných plynů. Kinetická energie střely je v palné zbrani získávána přeměnou chemické energie střeliviny (Planka, 2010).

4.3.2 Vnější balistika

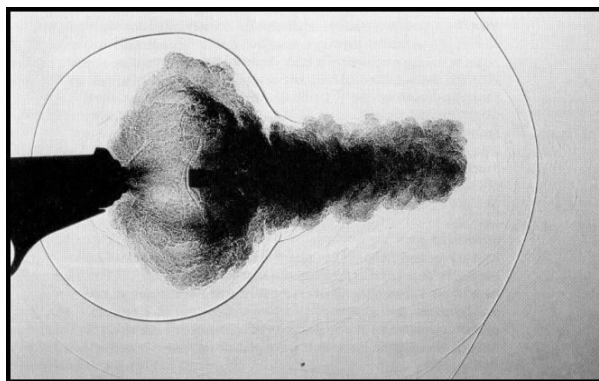
Pokud by na střelu po opuštění hlavně nepůsobila zemská tíže a odpor vzduchu, pohybovala by se stálou rychlostí po přímce. Pomalá střela (kamenná koule vystřelená z historického kanónu) nebo vržený kámen mají největší problém se zemskou přitažlivostí; odpor vzduchu je zanedbatelný a dráha má tvar paraboly.

Střely ručních planých zbraní putují po drahách, které mají tvar tzv. **balistické křivky**. Pod ostrým úhlem nahoru vystřelená, jednotná střela dosáhne vrcholu své dráhy, zemská přitažlivost zakřivuje dráhu dolů a odpor vzduchu střelu nestále zpomaluje. Sestupná část dráhy je kratší a v důsledku stabilizující rotace se střela odchyluje stranou. To dává balistické křivce její charakteristický, prostorový tvar (Planka, 2010).

Obecně lze dělit síly působící na letící střelu na základní (tíhová síla, odpor vzduchu) a doplňkové (Magnusová a Coriolisova síla jsou pravidelné, mezi náhodné patří síla buzená asymetrií povrchu střely) (Planka, 2010).

4.3.3 Přechodová balistika

Ústím hlavně procházejí téměř tři čtvrtiny energie výstřelu. Podstatná část je realizována prachovými plyny ve formě tlaku, tepla a pohybu. Po opuštění ústí má chování těchto plynů významný vliv na střelu a chování zbraně. Ústíové plyny jsou původcem efektů známých jako rána výstřelu a záblesk. **Složité děje probíhající na ústí hlavně** při výstřelu jsou zatíženy mnoha proměnnými a jsou pouze pomocí experimentálních metod a empirie. Metody záznamu velmi rychlých dějů umožnili studovat vznik a vývoj tlakových polí v okolí ústí hlavně palných zbraní a popsat jejich jednotlivé fáze (Planka, 2010).



Obr. 3 Proudění na ústí hlavně pistole (Planka, 2010)

4.3.4 Terminální balistika

Hlavním úkolem **koncové (terminální) balistiky** je analýza poslední fáze pohybu střely - fáze vnikání do cíle a proniku cílem. Samostatným odvětvím koncové balistiky, analyzujícím ranivý účinek střel a střepin na živé organismy, je **ranivá (vulnerativní, traumatická) balistika** (*balistika zranění - wound ballistics, resp. wundballistik*) (Juříček, 2000).

4.3.5 Ranivá balistika

Může mít přívlastky jako například vojenská nebo lovecká – pro odlišení specifiky používaných zbraní, střel a požadovaných účinků v cíli. Určuje i ranivost daného střeliva. **Ranivost závisí na objemu střelného kanálu.** Pro dosažení většího objemu se používají různé způsoby, je to v úpravě střely na větší účinek a zvýšení rychlosti (Kneubuehl, 2004).

Pod pojmem **ranivý účinek** rozumíme ničivý účinek střely na živou sílu (člověk, zvíře), spočívající v proniku střely oděvem nebo balistickou ochranou do těla a vyřazení, resp. zastavení cíle buď dočasně (zranění, traumatický šok), nebo trvale (usmrcení). Působením střely vzniká poškození tkání různého rozsahu, spojené s porušením souvislosti kůže, sliznice nebo povrchu některého vnitřního orgánu. Hovoříme tak o **střelném (projektilovém) poranění**.

Ranivá balistika posuzuje účinnost střel určitého typu na zvolený cíl z hlediska jeho možného **vyřazení**, resp. **zastavení**. Z vojenského hlediska je pod pojmem vyřazení nebo zastavení cíle chápáno dosažení takových účinků na živý organismus, které znemožní zasaženému cíli pokračovat (trvale nebo dočasně) ve vedení bojové činnosti. Obecně však vyřazení (resp. zastavení) cíle není podmíněno jeho zraněním nebo usmrcením.

Mechanismus pronikání střely do **živého cíle** je možné studovat ze dvou kvalitativně odlišných hledisek:

- *fyziologického (lékařského) a technického*

Při objasňování fyzikální podstaty účinku střel na živou sílu má v rámci ranivé balistiky prioritní postavení hledisko **technické**, bez něhož kvantitativní popis odolnosti živé síly není možný.

Při stanovení stupně poškození živého organismu střelami v závislosti na jejich konstrukčním uspořádání a balistických charakteristikách se však nelze obejít ani bez hledisek **lékařských**, která umožňují postihnout i specifika chování živého organismu, stupeň poškození živé tkáně a jemu odpovídající zranění v souvislosti s fyzickým i psychickým stavem zasaženého člověka, což jsou faktory, na nichž závisí ztráta či zachování bojeschopnosti resp. akceschopnosti zasaženého (Juříček, 2000).

4.3.6 Postterminální balistika

Zabývá se otázkami, které probíhají poté, co **střela nebo její fragment** nebo fragment cíle v podobě sekundární střely (obecně projektil) **opustí cíl**.

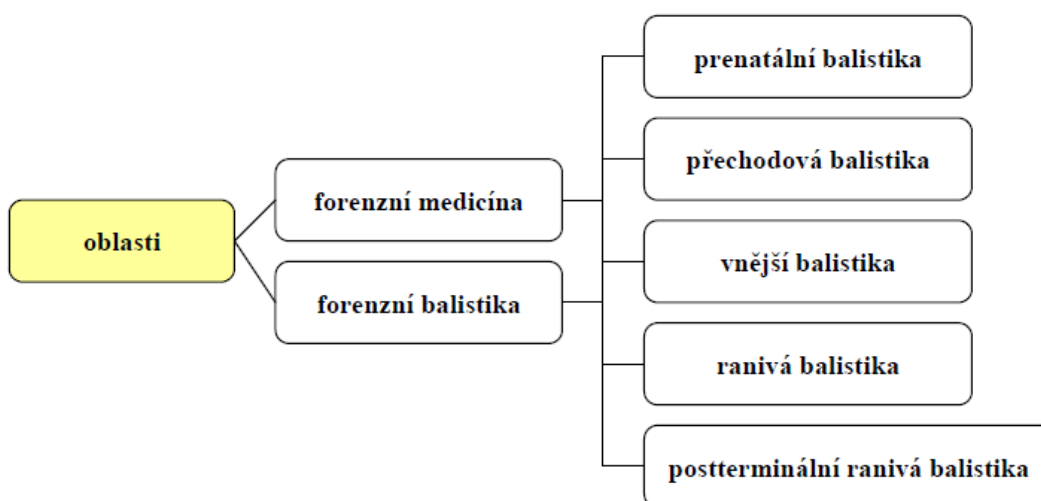
Kvalitativní podmínky pro vyřazení živé síly určitým typem střely by proto měly být výsledkem vhodného skloubení technických (balistických) a lékařských (traumatologických) přístupů k řešení tohoto problému.

Řešení, zavádění a používání zbraňových systémů, určených k přímému použití proti živé síle, včetně hodnocení jejich účinků má také své **právní a etické dimenze**.

4.4 Biobalistika

je relativně samostatná oblast moderní balistiky a kriminalistické balistiky, zabývající se interaktivní vazbou zbraňový systém - člověk. Jedná se o interdisciplinární vědu, která sdružuje některé soudně-lékařské a soudně-balistické otázky ranivé balistiky a zabývá se například modelováním účinků střelných zbraní na náhradních biologických cílech (hraničí s oblastí tzv. „technické medicíny“ a zasahuje do oblasti experimentální balistiky). Má širší rozsah než balistika ranivá, studuje nejen vliv střely na cíl, ale také vliv cíle na střelu (například biokoroze střely probíhající v tělech postřelených osob umožňuje stanovit dobu přežívání).

Zkoumá některé ergonomické vazby člověk-zbraň, například hranici velikosti odporu spouště, kdy střelec při psychicky náročné a vyhocené situaci ozbrojeného střetu „*neúmyslně*“ stiskne spoušť. Zajímá se o fyzikální vlastnosti biologických tkání z pohledu cílového materiálu a dalšími mezioborovými tématy (Vogel, 2005; Juříček 2017).



Obr. 4 Oblasti, do nichž zasahuje biobalistika (Planka, 2010)

5 PROBLÉM

5.1 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.

5.2 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.).

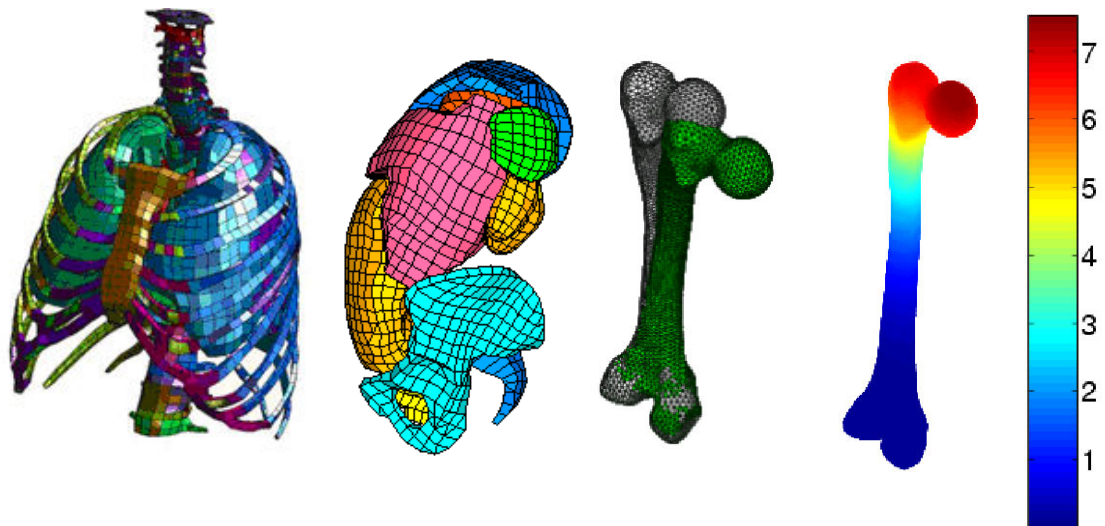
Výzkumy (Farjo & Miclau 1997; Cunningham et al., 2003; Kneubüehl et al., 2008), provádějící experimentální testování na živých (lidských) tkání, vyvolávají značnou **kontroverzi z etických důvodů**. Náhradním možným řešením je využití simulace pomocí umělých materiálů, jejichž hustota a viskozita se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



Obr. 5 *Matematická modelace lidských orgánů pro výpočet ranivých účinků a predikce očekávaného zranění (Cooper & Taylor, 2015)*

6 STŘELA A JEJÍ ÚČINEK

6.1 Historický vývoj střely

Nejstarší střílou byl nepochybně náhodně nalezený **kámen**, který svou velikostí odpovídal rozměrům dlaně. Toto vymezení velikosti je sice značně subjektivní, ale i tak můžeme odhadovat hmotnost těchto kamenů mezi 150 – 400 g. Je třeba také vzít v úvahu, že rozměry lidí v dřívějších dobách byly menší než dnes a menší a lehčí byly zřejmě i kameny, kterými házeli. Malé oblázky, které se používali do praků nebo při hodů kamenem do dálky, váží kolem 30 – 50 g (Kneubüehl, 2004).

Postupem času se vyvinula zařízení, pomocí kterých se dosahovalo větší počáteční energie než při pouhém hodů rukou. Tyto **mechanické střelné zbraně** (velké praky, katapulty...) měli různé, důmyslné systémy pohonu, založené například na využití těžkého břemene nebo pružnosti materiálu. U nich se nejdříve uložila práce několika lidí (zdvížením těžkého břemene či natažení pružných lan), a poté byla spotřebována při jediném hodů. Kamenné střely a různé vrhací stroje sloužily ještě ve středověku. Jejich používání neskončilo ani s objevem černého prachu, který střelám dodával podstatně více energie. Časem se prosadily střely kulového tvaru, které při svém letu spotřebovávaly méně své počáteční kinetické energie a měly větší dostřel než jiné střely (Kneubüehl, 2004).

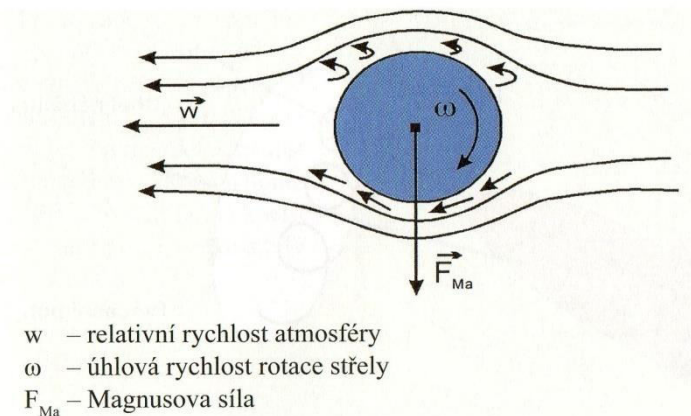
Konec používání kamenných střel nastal se zvyšováním nároků na výkon děl. Síly působící na střely překračovaly pevnost kamenů. Navíc se objevily jiné materiály – olovo a železo, které se k výrobě střel hodily podstatně lépe a jejich účinnost byla znatelně větší (Kneubüehl, 2004).

Dnes již zřejmě nezjistíme, jakými vývojovými stádii prošly **šípky** a **šípy**. Asi největším problémem byla stabilizace, přičemž časem se prosadila šípová a křídlová stabilizace. Výhody stabilně letící šípky nebo šípu jsou zřejmě na první pohled: šípka o hmotnosti pouhých 40 gramů má větší průřezové zatížení než ocelová koule hmotnosti 7kg. Šípová střela navíc předává cíli značnou část energie, kterou získala při výstřelu.

Nabízí se otázka, jaké provedení šípu by zajistilo co největší dostřel. Máme-li luk určité napínací síly a napínací délky, jsou jedinými proměnnými parametry šípu jeho hmotnost a průměr. Důsledkem velké hodnoty zatížení průřezu šípu není jen minimální velikost odporu vzduchu, ale také překvapující průbojnost při zásahu pevných cílů (zvěřiny, rytířské zbroje atd.) Při vniku do děla zvířete není důležitá dopadová energie, ale v první řadě hustota energie. Při stejné rychlosti je hustota energie úměrná zatížení průřezu.

Velký dostřel a přitom dostatečný účinek v cíli byly ve středověku důvody rozhodujícího významu lukostřelců pro výsledek bitvy. Anglické dlouhé luky měly dostřel až 1000 yardů (cca 900 m) (Kneubüehl, 2004).

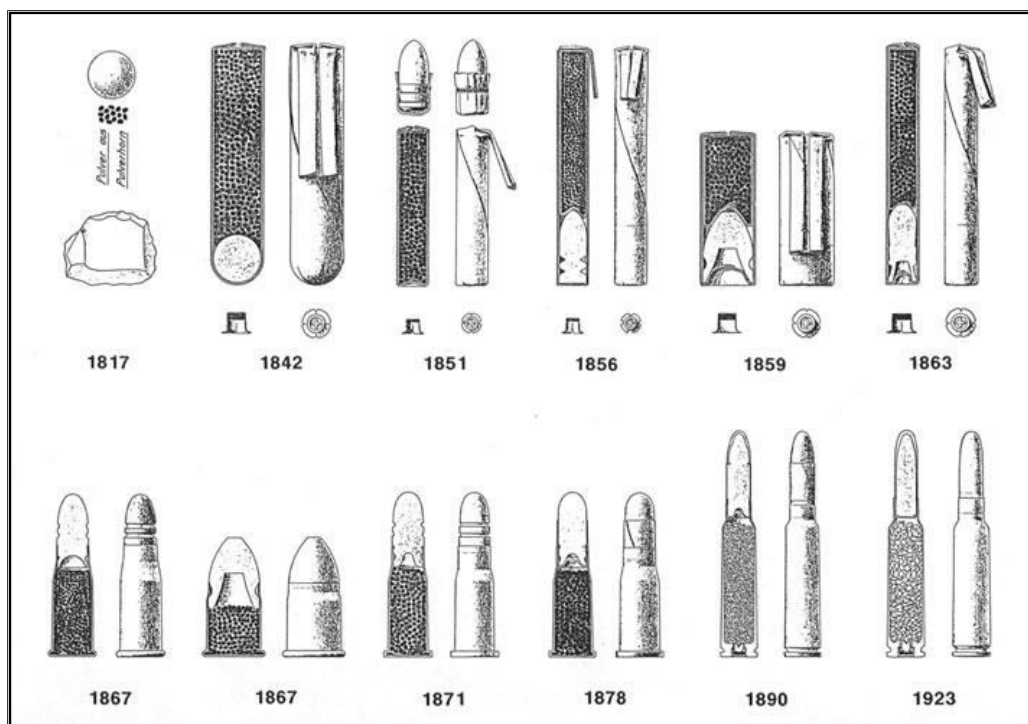
Koule byla po staletí charakteristickým tvarem střel a v laickém označení střely pro ruční zbraně se v jisté formě stále používá – „kulka“. Postupem času se sférické střely u nově vyvíjených zbraní přestaly používat. Dnes se s nimi setkáme u historických zbraní (perkusní zbraně a repliky), paintballových zbraní, u brokových nábojů a příležitostně u vzduchovek. Díky svému souměrnému tvaru má koule, nezávisle na své poloze na letové dráze a rotaci, stále stejné zatížení průřezu a obvykle a obvykle na ni za letu nepůsobí žádné příčné síly. Pokud se sférická střela otáčí kolem osy kolmé ke směru svého letu, vyvolá obtékající vzduch **Magnusův jev** (obrázek č.6). Přitom působí kolmo na osu otáčení a směr pohybu Magnusova síla, která střelu odchyluje od původní dráhy jejího pohybu (Kneubüehl, 2004).



Obr. 6 Magnusova síla (Planka, 2010)

Při vodorovné poloze osy otáčení působí Magnusová síla – při vhodné volbě smyslu otáčení – směrem nahoru. Takto vzniklá vztlaková síla vede k podstatnému zvýšení dostřelu sférických střel. Při otáčení v opačném smyslu Magnusova síla směřuje dolů a dostřel se tak odpovídajícím způsobem zkracuje. Je pozoruhodné, že toto chování sférických střel bylo známo již ve středověku a při střelbě z děl se systematicky využívalo (Kneubüehl, 2004).

K vyvolání požadovaného otáčení se vyráběly kulové střely, u kterých mělo těžiště jinou polohu než geometrický střed kulového tvaru střely. Pokud se taková střela nabíla do hlavně tak, že těžiště leželo nad osou vývrtu, vznikl při výstřelu moment síly (tlaková síla prachových plynů měla střed svého působení pod těžištěm), který roztáčel střelu. Na své horní straně se střela otáčela proti směru svého posuvného pohybu, čímž vznikla nahoru směřující Magnusova síla, která přinesla prodloužení dostřelu. Když se střela do hlavně nabíla s těžištěm pod osou vývrtu, výsledkem bylo otáčení střely v opačném směru a odpovídající zkrácení dostřelu (Kneubüehl, 2004).



Obr. 7 Vývoj střeliva z ručních zbraní od počátku 19. století v tomto případě zbraní švýcarské armády (Kneubüehl et al., 2008)

6.2 Základní princip střely

Za vynález střely se dá považovat hozený kámen jako lovecký pokus nebo vlastní obrana před zvěří či nepřítelem v dávných dobách dějin lidstva. Prvním hodem kamene se zároveň uskutečnil první přenos energie na větší vzdálenost.

Prapůvodní princip střely zůstal zachován až do současnosti. Účelem střely je **doprava energie** na určitou vzdálenost a její **využití** k vyvolání (ničivého) **účinku v cíli**. Část kinetické energie střely se při jejím pohybu přemění na práci, potřebnou k překonání odporu vzduchu a zemské přitažlivosti. Střela proto musí mít při výstřelu dostatek energie na překonání vzdálenosti a způsobení požadovaného účinku (Sellier & Kneubüehl, 1994).

6.3 Energetické poměry

Množství energie, potřebné k dopravě na cíl a k vyvolání dostatečného účinku v cíli, je především dáno konstrukcí a předpokládaným účelem střely. Na rozdíl od lovecké munice, které jsou konstruovány tak, aby měla střela při zásahu cíle, co největší pohybovou energii, jsou střely používané ve vojenských zbraních zpravidla konstruovány pro co největší dostřel. Vzhledem k požadavku humánního vedení války (*stanovenému Haagským Řádem vedení pozemní války*) je třeba účinek vojenských střel omezit na co nejnižší míru. Střely tak mohou mít aerodynamický optimální tvar, díky němuž je pokles rychlosti a energie střel na jejich dráze velmi malý. Pro velikost počáteční energie vojenských střel jsou určující nároky vnější balistiky. Usiluje se

především o co nejplošší dráhu letu střely. Tyto snahy vedou k tomu, že energie střel jsou vyšší než energie nezbytně nutné. Omezení účinku se pak dosahuje stabilitou a konstrukcí střely. Krátké palné zbraně se většinou používají jen pro střelbu na velmi krátké vzdálenosti a tak je i spotřeba energie při letu střely malá (Sellier & Kneubüehl, 1994).

6.4 Konstrukce střely

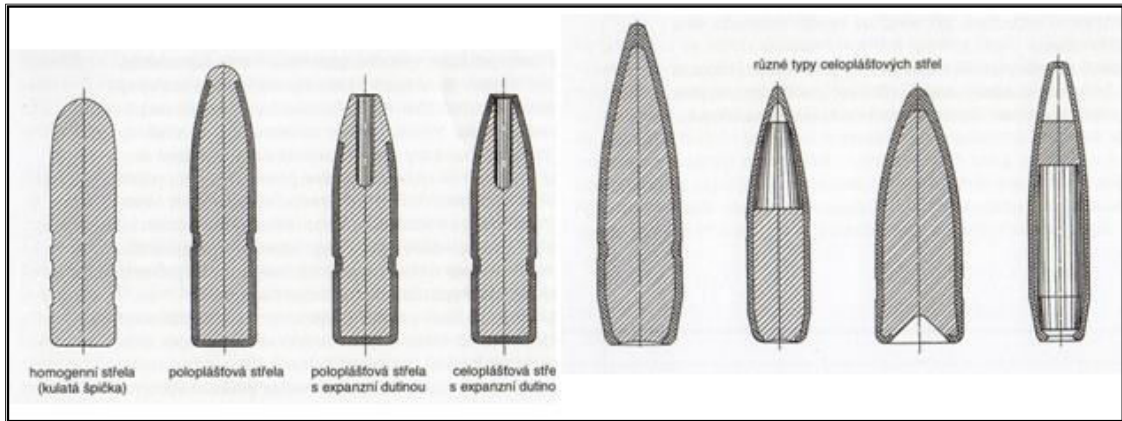
Úkolem střely je **doprava potřebné energie do cíle a využití této energie v cíli** k dosažení požadovaného účinku (porušení tkáně). Střele je proto nutné při výstřelu udělit určitou rychlost. Při konstruování střely se musí brát v úvahu různá hlediska a požadavky. U střely vystavené působením značných sil, dochází k nežádoucím deformacím.

Tvar střely musí být zvolen tak, aby zabezpečil její pravidelné a spolehlivé urychlení v hlavni. Při letu vzduchem musí střela klást svému prostředí co nejmenší odpor, aby se omezil úbytek energie, potřebné pro dosažení účinku v cíli. Střely získávaly postupně podlouhlý tvar. Výhoda tohoto tvaru jsou lepší aerodynamické a balistické vlastnosti. Nejčastějšími tvary střel jsou protáhlé válce s tupou, půlkulovitou, kuželovitou nebo ogivální špičkou. Růst rychlosti střel a požadavek na velký dostřel (a tedy menší aerodynamický odpor) vedl k zašpičatění střel v přední části a také přidání aerodynamického kužele v zadní části. Střela s aerodynamickou úpravou na obou stranách se nazývá biogivální.

Při letu střely nesmí docházet k jejímu nekontrolovatelnému pohybu (převracení). U vojenských střel se požaduje, aby po zásahu cíle účinkovaly rychle a spolehlivě. U sportovních střel se požaduje vysoká přesnost zásahu a jeho jednoznačné vyznačení na terči. Tyto a další požadavky stěží může splnit jediný typ střel. Střely klasifikujeme podle jejich tvaru, použitého materiálu a konstrukce.

- ***Celoplášťové*** - velká průbojnost, malá deformovatelnost. Nepředává cíli obvykle všechnu energii, dochází k průstřelu)
- ***Poloplášťové střely*** - olověné jádro střely je v přední části střely obnaženo. Charakteristické je, že střela se po zásahu deformuje, má menší průbojnost, vyšší ranivý účinek. Jádro se někdy provádí ze dvou různě tvrdých slitin olova. Měkčí část jádra se deformuje a tvrdší si zachovává tvar
- ***Celoolověné střely***
- ***Expanzní střely*** – je obvykle druh poloplášťové střely, která má dutinu v přední části. Tato dutina vede k hřibovité deformaci po zásahu. Protože dutina zhoršuje aerodynamiku, bývá někdy překryta tenkostěnnou kuklou, nebo vyplněna měkkým materiálem

- **Homogenní střely** - střela je vyrobena v základu z jednoho materiálu, například z tombaku. Někdy se do ní vkládá olovo například formou vyvrtání. Střela má lepší soudržnost – například při zásahu kosti
- **Speciální střely s řízenou deformací** - různé konstrukční uspořádání.



Obr. 8 Střely různého provedení zleva homogenní střela s kulatou špičkou, poloplášťová střela, poloplášťová střela s expanzní dutinou, celoplášťová střela s expanzní dutinou, různé typy celoplášťových střel (Bílý, 2000)

6.5 Značení střel

Mezi nejčastěji používané typy (zejména díky ceně a legislativě) na českém trhu pro krátké palné zbraně patří střely:

- Full Metal Jacket (*celokovový plášť - FMJ*)
- poloplášťová s měkkou špičkou Soft Point (*SP*)
- olovená s oblou špičkou (*LRN*)
- poloplášťová s dutinou ve špičce (*HP, GD*) - s řízenou deformací
- Semijacketed Soft Point – Flat (*SJSP – flat*) - poloplášťová střela s plochou špičkou

6.6 Charakteristika puškových nábojů

Základem bojové síly každé armády jsou zbraňové systémy, které jsou schopny vyřadit nejrůznější cíle protivníka s využitím široké škály ničivých faktorů. Malorážové střelivo ručních zbraní je tvořeno náboji nejrůznějších konstrukčních provedení (Klein & Ferko, 2004).

Účinek střely na člověka je výsledkem působení řady faktorů, které mají nejen **deterministický**, ale i **stochastický** charakter. Jinak řečeno, řada faktorů ranivosti střely je poměrně přesně definována (balistické charakteristiky střeliva, chování střely v

tkaních, apod.), jiné jsou však výsledkem působení mnoha náhodných vlivů (místo zásahu na těle, směr pohybu střely, zasažení životně důležitých orgánů, zdravotní stav zasaženého před zásahem střelou, jeho psychická odolnost, vitalita a stupeň nasazení, druh oblečení, charakter případně překážky, dostupnost a kvalita lékařské péče (Komenda, 2012)

Převážná většina střel je tvořena pouze kovovými materiály (zejména ocel a barevné kovy), přičemž jejich účinek v cíli je zajištěn kinetickou dopadovou energií postupu a rotačního pohybu (Komenda, 1993).

Pro vojenské puškové náboje současnosti jsou charakteristické tyto konstrukční znaky, významné z hlediska ranivé balistiky:

- střely jsou výhradně celoplášťové, různé konstrukce a účinku v cíli (s olověným nebo měkkým ocelovým jádrem proti živé síle, průbojně s tvrdým ocelovým jádrem, zápalné, svítící)
- ráže střel v rozmezí 5 až 9 mm
- délka střel 3,5 až 5 ráží
- počáteční rychlost střel
- stabilizace střel na dráze letu rotací (gyroskopická)
- úroveň stability na dráze letu různorodá v závislosti na konstrukci střely a použitém zbraňovém systému

Vedle celoplášťové konstrukce střely, která je typickým rysem vojenského střeliva, je charakteristickým znakem většiny moderních vojenských střel také ogivální přední část a často i zadní část (tzv. biogivální střela). Zřejmou výhodou tohoto tvaru střely je snížení odporu vzduchu při jejím pohybu na cíl. To umožňuje střele udržet si rychlost pohybu pro dosažení požadovaného účinku v cíli na větší vzdálenost (Juříček, 2000).

Ústové energie malorážových střel, vystřelených z ručních zbraní dosahují úrovně několika stovek až několika tisíc joulů. Podle vnitřního uspořádání i celkového konstrukčního řešení a tedy i ranivého potenciálu dělíme střely na **homogenní** a **nehomogenní**. Zvláštním druhem střel specifického vnějšího tvaru i vnitřního uspořádání jsou střely **expanzní**.

6.6.1 Nehomogenní střely

Nehomogenní (skládané) střely jsou sestavou více konstrukčních částí, jednou z nich je obvykle plášť, pokrývající vnější povrch střely - jde tedy o střely plášťované (plášťové).

Podle rozsahu pokrytí vnějšího povrchu stěny pláštěm, rozlišujeme plášťované střely:

A) Celoplášťované (Celoplášťové) které mají celý svůj vnější povrch (často s výjimkou dna) krytý tenkostěnnými kovovým pláštěm o tloušťce několika desetin milimetrů. Plášť je vyroben nejčastěji z tombaku nebo z oceli plátované tobakem. Jádro střely může být buď olovené, nebo ocelové. U střel s ocelovým jádrem se vkládá mezi jádro a plášť tenká vrstva olova, tzv. *košilka*.



Obr. 9 Puškové vojenské náboje s celoplášťovými střelami (zleva): 1 - 7,62 x 54R; 2 - 7,62 x 51 (standart NATO); 3 - 7,62 x 39; 4 - 5,45 x 39; 5 - 5,56 x 45 (standart NATO) (Juříček, 2000)

B) Poloplášťované (Poloplášťové) střely, vyrobené obvykle z olova, které tvoří jádro kryté pláštěm pouze v zadní části. Pláštěm nekrytá olovená špička se při dopadu i na méně odolnou překážku deformuje, proto má poloplášťovaná střela lepší schopnost předat svou energii zasažené cíli, což se projeví ve větší ranivosti a menší průbojnosti střely (Backstein et al., 1972; Goad & Halsey, 1982).



Obr. 10 Revolverové náboje ráže .357 Magnum se střelou celoplášťovou - FMJ (vlevo), polopášťovou - SP (uprostřed) a expansivní - HP (vpravo) (Jučíček, 2000)

6.6.2 Homogenní střely

Homogenní střely jsou vyrobeny z jednoho druhu materiálu, nejčastěji olova. Tyto střely jsou vždy neplášťované (bezplášťové). Poměrně časté je u těchto střel elektrochemické pokovení vnějšího povrchu mědí. Tato velmi tenká vrstva plní funkci pseudopláště, který však neovlivňuje velmi dobré deformační schopnosti homogenních střel (Backstein et al., 1972).

6.6.3 Expanzní střely (HP, GD)

Expanzní střely (obrázek č. 12) jsou specifickým druhem střel nejen svým vnějším tvarem, ale i vnitřním uspořádáním. Tyto střely mají v přední části dutinu, která může být krytá nebo nekrytá. Nekrytá dutina u pistolových a revolverových střel sice výrazně zhoršuje letové vlastnosti střely, ale při dopadu do cíle usnadňuje deformaci střely, a tím i předání energie střely zasaženému cíli, což zvyšuje ranivý, resp. zastavující účinek střely.

Na přední části pláště expanzní střely mohou být navíc i podélné zářezy, resp. prolisy, které zlepšují pravidelnost deformace střely.



obr. 11 *Pistolový náboj ráže 9 mm Luger s expanzivní střelou Gold Dot (vlevo) a expandovaná střela po proniku želatinovým zkušebním blokem (vpravo) (Juříček, 2000)*

Expanzivní střely spolu se střelami průbojnými tvoří skupinu střel se zesíleným účinkem. Ranivost a průbojnost jsou u běžných typů střel z hlediska kritérií koncové balistiky spojitě nádoby. Střela s extrémní deformací (expanzí) má tedy po proniku do tkáně velkou ranivost a malou průbojnost (a naopak).



Obr. 12 *Expanzivní celoplášťové střely EFMJ různé ráže a různého stupně expanze po proniku zkušebním blokem z náhradního materiálu (Juříček, 2000)*

Expanzní střelivo je uvolněno k použití obvykle jen u speciálních policejních složek. Ve vojenské sféře však mohou uplatnit i střely speciální konstrukce. Obdobného efektu na živé tkáni jako u expanzivních střel se dosáhne nestabilním pronikem střely tkáněmi (střela se při proniku převrací). To je charakteristické i pro některé druhy mikrorážových střel vojenského střeliva.

6.7 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).

6.7.1 Pistolové a revolverové střelivo

A) Náboj **9mm Luger s celoplášťovou střelou** je nejznámější a nejrozšířenější pistolový náboj na světě. V Evropě se používalo pro označování tohoto náboje názvu 9mm Parabellum. Byl vyvinut již v roce 1902 firmou DWM pro armádní pistoli Georga Lugera, původně zkonstruovanou v ráži 7,65mm Parabellum. Náboj 9mm Luger se vyráběl a vyrábí v mnoha zemích v celé řadě variant jako vojenský, obranný a sportovní náboj, lišící se od sebe konstrukcí, hmotností, druhem a tvarem střely, materiálem nábojnic a v neposlední řadě balistickými hodnotami.

Experimentálně byl posouzen účinek střely náboje 9mm Luger vyráběný tuzemskou firmou **Sellier & Bellot**. Základní provedení tohoto náboje má mosaznou nábojnici a celoplášťovou střelu s olověným jádrem. Počáteční rychlost střely o hmotnosti 8.0 g udává výrobce kolem 360 ms^{-1} ($E_o = 518 \text{ J}$).



Obr. 13 9mm Luger s celoplášťovou střelou vyráběný tuzemskou firmou Sellier & Bellot

B) Náboj **Fiocchi 9 mm Luger Black Mamba Duty** je z řady Top Defence se střelou Black Mamba. Střela TC (komolý kužel) je kompletně potažená černým tombakem 90/10 a zajišťujícím stále čistou hlaveň. Střela je maximálně odlehčená s důrazem na maximální předání energie při dopadu do měkkého a středně měkkého cíle (zvýšený zastavující efekt). Náboj Fiocchi Black Mamba Duty je osazen netoxickou zápalkou a extra bezdýmným prachem.



Obr. 14 9mm Luger Black Mamba Duty celoplášťová střela s přední částí tvaru komolého kužele vyráběný firmou Fiocchi

C) Náboj **7,62 × 25 mm Tokarev** je ruský pistolový náboj se středovým zápalem a nábojnicí lahvovitého tvaru, široce používaný v bývalém Sovětském svazu a jeho satelitech, stejně tak v asijských zemích jako Čína, Pákistán atd. V ruských službách byl postupně nahrazen nábojem 9×18 mm Makarov.

Pistolový náboj 7.62x25mm Tokarev v provedení celoplášť. Celoplášťovou střelou FMJ tvoří olověné jádro překryté kovovým pláštěm. Vzhledem k pevné konstrukci vytváří střela hladký průstřel bez devastace tkáně, neboť se nedeformuje při zásahu cíle. Dále má tento náboj vynikající penetrační schopnosti a dokáže snadno prorazit lehčí balistické vesty (NIJ I a IIA), stejně jako některé kevlarové přilby, jako je například U.S. PASGT (*Personal Aromor System for Ground Troops*). Počáteční rychlost střely o hmotnosti 5.5 g udává výrobce kolem 505 ms^{-1} ($E_o = 693 \text{ J}$).



Obr. 15 7,62 × 25 mm Tokarev je ruský celoplášťový pistolový náboj vyráběný firmou *Sellier & Bellot*

D) Revolverové střelivo ráže **.357 Magnum GOLD DOT** vyráběné firmou **Speer**. Je považována v současné době na trhu jako jeden z nejlepších nábojů určených k sebeobraně. Celoplášťová střela kuželovou přední částí a plochou špičkou, ve které je dutina kuželového tvaru je konstruována pro řízenou deformaci, dále se vyznačuje vysokým zastavovacím účinkem, při současném zachování její dostatečné průbojnosti. Jádro je olovené.

Počáteční rychlost o hmotnosti 8.1 g udává výrobcem kolem 380 ms^{-1} ($E_o = 703 \text{ J}$).



Obr. 16 Náboj 9mm .357 Magnum GOLD DOT celoplášťová střela s kuželovou přední částí a vysokým zastavovacím účinkem vyráběný firmou *Speer*

E) Náboj **.357 Magnum FMJ**. Celoplášťová střela s průměrem 9.07 mm s oloveným jádrem, které je překryto kovovým pláštěm. Vznik tohoto náboje se datuje do

roku 1934 a následně dochází k enormnímu prodeji. Pro svou pevnou konstrukci vytváří střela hladký průstřel a díky tomu vynikající penetrační schopnosti neboť se nedeformuje při zásahu cíle. Tento náboj je velmi oblíbený pro lov "vysoké zvěře", neboť své užití uplatnil i při lovu nebezpečných zvířat jako jsou medvědi, kopytníci apod.

Počáteční rychlost o hmotnosti 10.25 g udává výrobcem kolem 385 ms^{-1} ($E_o = 600 \text{ J}$).



Obr. 17 Náboj 9mm .357 Magnum celoplášťová střela s olověným jádrem, které je překryto kovovým pláštěm

F) Náboj **.44 Remington Magnum** je náboj vyvinutý původně pro revolvery, ale rychle se ujal i v karabinách a puškách.

Od 20. let 20. století se snažil známý milovník zbraní Elmer Keith vyvinout výkonný lovecký náboj pro revolver. Jeho práce vycházela z tehdy oblíbené ráže .44 Special. Výsledkem pak byl náboj osazený těžkou střelou o hmotnosti až 250 gr. a výkonem kolem 1000 J . Komerčně se mu však nepodařilo prosadit, protože se výrobci zbraní obávali možné záměny Keithova náboje s rozměrově shodným .44 Special, což by pravděpodobně mnohdy vedlo k poškození zbraně a tím i případnému zranění střelce.

V 50. letech pak vyvinula firma Remington náboj .44 Remington Magnum (používá se i zkrácené .44 Magnum) o hmotnosti 180 gr. Nábojnici má o cca 3 mm delší než .44 Speciál a nevejde se tak do revolveru komorovaného pro tento slabší náboj. Běžné tovární laborace se pohybují od 900 až do 1600 J . Tato poloplášťová střela se zploštělou špičkou - komolý kužel, s počáteční rychlostí 360 MS^{-1} dosahuje počáteční energie $E_o = 1010 \text{ J}$.



Obr. 18 .44 Magnum poloplášťová střela se zploštělou špičkou

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

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. 19 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. 20 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

6.8 Kritérii účinnosti puškových střel

Jako míra pro účinek střely v cíli byla zvolena **energie** nebo **hybnost** dopadající střely. Účinek střely v cíli závisí ale i na řadě dalších faktorů. Ke kvantifikovanému hodnocení ranivých účinků se používá řada kritérií ranivosti (**casualty criterion**). Praxe ukazuje, že účinnost puškové střely nemůže být obecně popsána jediným energetickým ukazatelem, jak se může zdát z uvedené etapizace vývoje kritérií účinnosti.

Stanovit stupeň tkáňového poškození zasažené živé síly puškovou střelou, probíhal ve třech relativně samostatných vývojových etapách:

- Posouzení účinnosti **puškových střel** podle toho, zda jejich dopadová energie je postačující k proražení **ekvivalentní překážky určité tloušťky**. Řada autorů se vyhýbá použití kvantitativních kritérií, vyjadřujících účinnost puškové střely, vhodnou fyzikální charakteristikou. Tito autoři srovnávají odolnost cíle typu nechráněná živá síla s odolností ekvivalentní překážky z náhradního materiálu určité tloušťky (smrkové nebo jedlové dřevo, blok telefonních seznamů nebo svazek navlhlého novinového papíru atp.) První kritérium účinnosti puškové střely tohoto typu postavil Rhone (*Německo*) již v roce 1896. Stanovil, že účinnou střelou proti měkkým cílům je ta, která prorazí ocelový plech tloušťky 1,5 mm (ocel 37, DIN 17 100), přičemž při svém průměru 7 mm spotřebuje asi 80 J. Podle toho pak tato odevzdaná energie je dostatečná k vyrazení živé síly z boje. Kritéria, vycházející z průrazu tuhých náhradních materiálů, mají spíše orientační charakter a slouží pouze pro vzájemné porovnání účinků střel stejné ráže, ale různého konstrukčního uspořádání. Navíc se v nich více projevuje průbojná složka ranivého účinku, proto jsou podle nich střely s dobrou průbojností lépe hodnoceny (Juříček, 2017)
- Stanovení **limitní hodnoty** dopadové energie **E_a** střely, která ještě zajistí vyrazení živé síly z bojové činnosti, nebo určení jiné fyzikální veličiny. Za vhodnější lze považovat kritéria, která definují odolnost živé síly a tedy i účinnost střely určitou hodnotou vhodně zvolené fyzikální veličiny, vycházející z balistických vlastností dopadající střely. První, historicky starší názor, který vychází z účinků puškových střel, charakterizuje jejich účinnost **absolutní kinetickou energií** dopadající střely na cíl typu nekrytá živá síla, v **limitním tvaru**:

$$E_{\text{lim}} = \frac{1}{2} \cdot m_q \cdot v_{\text{lim}}^2, \quad [\text{J}]$$

kde v_{lim} je limitní rychlost střely v (ms^{-1}), tj. nejnižší možná rychlost konkrétní střely o hmotnosti m_q v (kg), která právě ještě zabezpečí vyrazení živé síly. Již bylo uvedeno, je analýza účinnosti puškových střel složitým problémem

a to v důsledku nehomogenity lidského těla a s ní spojené různé zranitelnosti jeho jednotlivých částí dopadající střelou určité energie. Vyhodnocením střelných poranění osob bylo zjištěno, že při dopadové energii střely $40-50 J$ dochází ke zranění měkkých částí těla, střela s energií okolo $120 J$ způsobuje obvykle těžká zranění, která mohou být doprovázena roztržením silných kostí. Kromě energie mohou být k popisu účinnosti střel využity i jiné fyzikální veličiny - např. **hybnost** nebo **subenergie**. U těchto dvou kritérií je přikládán menší význam dopadové rychlosti střely ve srovnání se standardním vyjádřením kritéria kinetické energie, což je podle některých autorů více v souladu se stavbou a vlastnostmi organismu člověka.

- Historicky nejnovější a realitě pravděpodobně nejbližší je **kritérium měrné kinetické energie střely**, které uvažuje kromě absolutní úrovně energie střely i vliv jejího tvaru a velikosti na dosažený ničivý účinek v cíli. Při provedení vzájemného srovnání kritérií účinnosti zjistíme, že pro **kritéria absolutní energie, subenergie i hybnosti** je charakteristický dominantní vliv **hmotnosti střely** na dosažený účinek v cíli. Jsou proto použitelná především pro hodnocení účinnosti malorážových střel, jejichž několikagramové hmotnosti se pohybují v úzkém intervalu. Určení **pravděpodobnosti vyřazení** živé síly z bojové činnosti **puškovou střelou** určité kinetické energie. Třetí vývojová etapa (pravděpodobnostní) kritérií účinnosti puškových střel má pro **vojenskou ranivou balistiku** zásadní význam. Pro svou složitost a vysokou náročnost materiálního zabezpečení těchto experimentů je pochopitelné, že tato etapa rozvoje kritérií účinnosti puškových střel má svůj počátek ve výrazně poválečném období a probíhá doposud (Juříček, 2017)

Balistický experiment je vedle zkoumání skutečných střelných poranění v tomto přístupu nezastupitelný. Zásadní význam má **průběh** (místo, směr a tvar) **střelného kanálu** v těle zasaženého člověka. Střela pronikající **krkem** má zcela jiný účinek než střela procházející **měkkými částmi stehna** i při stejné úrovni předané kinetické energie $E_{PŘ}$.

6.9 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

7 BALISTICKÉ TRAUMA, PRINCIPY ZRAŇOVANÍ TKÁNĚ

7.1 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. Přejechy 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) $600-750 \text{ ms}^{-1}$, 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.

7.2 Diferenciace střelného poranění

7.2.1 Střela

formy (běžná nebo speciální) střel je možné posuzovat z hlediska jejich finálně-efektivních částí tj. zdeformovaná střela, zbytky pláště a jádra střely. Vedlejšími produkty výstřelu jsou povýstřelové zplodiny - zbytky kovů vzniklé otěrem střely v hlavni, fragmenty kovů zápalky, zbytky zápalkové složky, nespálená a popálená prachová zrna, plyny vznikající hořením střelného prachu. Kovové částice mohou být tvořeny prvky Pb, Cu, Ni, Fe, Sn, Sb, Ba popřípadě dalšími, podle jejich užití při výrobě střely (Planka, 2010).

7.2.2 Poranění

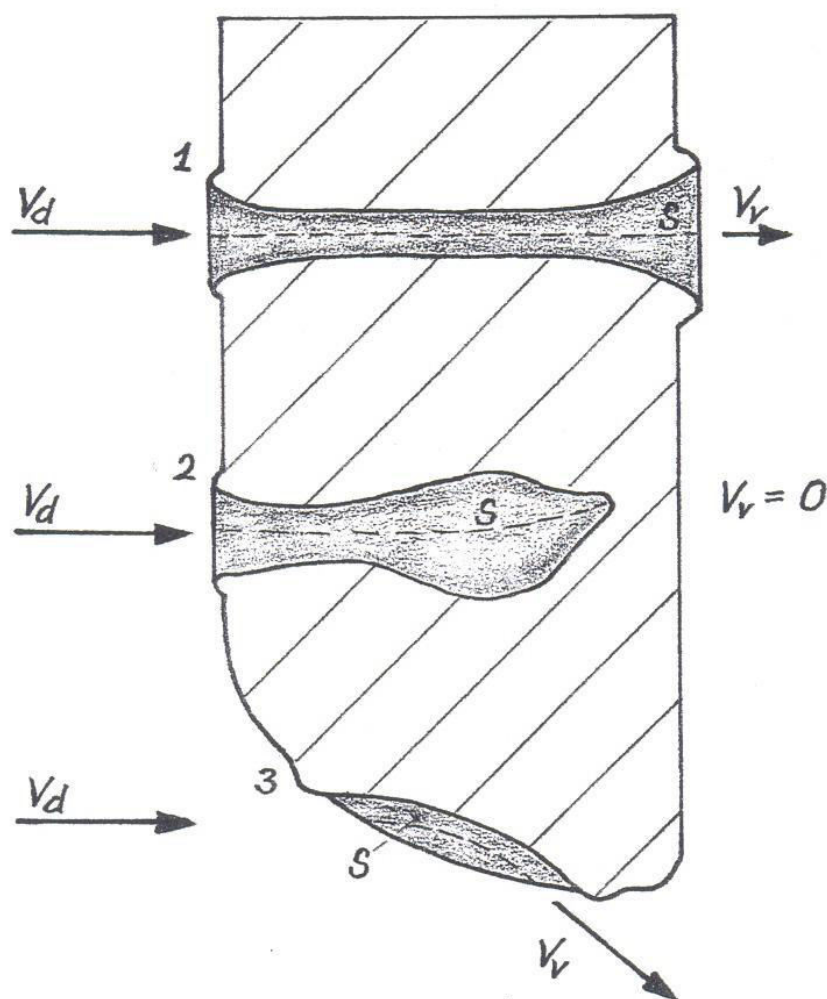
Střelná poranění jsou způsobena jedinečným účinkem střelné zbraně. Průbojná schopnost projektilu je dána schopností pronikat tkání. Projektil může díky své průbojnosti způsobit:

a) průstřel - projektil proniká do těla otvorem označeným jako vstřel, prochází jím za vzniku střelného kanálu a tělo opouští otvorem označeným jako výstřel. U **stabilně** pronikajících střel je střelný kanál přímočarý.

b) zástřel - projektil do těla pronikne, vytváří kratší či delší střelný kanál a zůstává na jeho konci. tzn. dopadová kinetická energie střely je nedostatečná (podlimitní) k proniku tkání, nebo je střela schopna předat cíli veškerou dopadovou energii, dochází k **zástřelu**, kdy střela uvízne v tkáních.

c) nástřel - projektil zasáhne povrch těla a nemá již dostatek energie k tomu, aby do těla pronikl.

d) postřel - střela zasáhne organismus jen tečně, projektil sklouzne po povrchu a zanechává na kůži různě hluboký oděrek.



Obr. 21 Charakteristický tvar střelného kanálu v bloku náhradního materiálu
(Juříček & Komenda, 2003)

Legenda: průstřel (1), zástřel (2) a postřel (3); v_d (v_v) – dopadová (výletová) rychlost střely,
(S) – střelný kanál

7.2.3 Vstřel (místo vstupu do cíle)

Při dopadu projektilu se kožní tkáň roztrhne v rozsahu jeho čelní plochy na mikroskopické částičky. V podobě gejzíru se částičky pohybují proti směru pohybu projektilu. Projektil pronikající kůží, se tře svou čelní a boční plochou o tkáň v bezprostředním okolí vyraženého otvoru v kůži. Tak vzniká základní charakteristika vstřelu. Tyto znaky má každý vstřelový otvor bez ohledu na to, z jaké vzdálenosti bylo vystřeleno. Vstřel je však charakterizován i vedlejšími faktory střelení (zbytky nespáleného střelného prachu, saze, kovové mikročástičky), které vylétají z hlavně za projektilem a uplatní se obvykle jen do vzdálenosti dvojnásobku délky hlavně použité zbraně (Planka, 2010)

7.2.4 Výstřel (místo výstupu projektilu)

Výstřel vzniká po té, co projektil projde tělem/cílem (pokud k tomu dojde), kůže se vypne a na vrcholu jejího vyklenutí proráží střela pokožku. Výstřel bývá při střelbě z větší vzdálenosti obvykle větší než vstřel, což je zapříčiněno tím, že střela při průniku tělem na sebe nabaluje části tkáně, úlomky kostí nebo se deformuje. Může se také stát, že vychází z těla uchýlená od podélné osy (např. bokem). Výstřel má tvar nepravidelný, hvězdicovitý, cípatý, rozparkovitý.

7.3 Charakter střelného kanálu

Střelné poranění je charakterizováno **střelným kanálem**, který lze definovat jako otvor vytvořený v materiálu průnikem konkrétní střely. Při dopadu **střely** vzniká v tkáních intenzivní **rázová vlna s přetlakem** na jejím čele. Tato vlna se šíří tkáněmi a zasahuje obvykle tkáň dříve než vlastní střela. Kinetická energie přenesená na tkáň rázovou vlnou vyvolává jejich pohyb vpřed (ve směru pohybu střely) a do stran (v radiálním směru od střelného kanálu). Po počáteční fázi přetlaku, který trvá několik mikrosekund, následuje **fáze podtlaku** (Juříček, 2013).

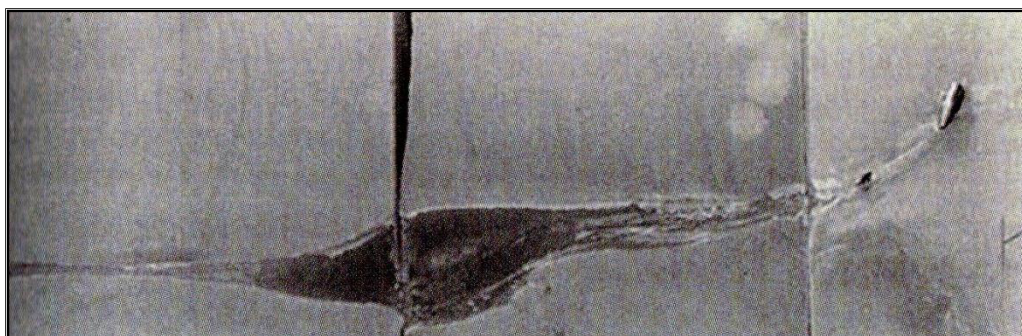
Střelný kanál (kaverna) - vzniká pronikáním projektilu tkáněmi, ale svým rozsahem neodpovídá velikosti projektilu. Podle soudržnosti probíjené tkáně se tvoří tzv. *kaverny*, většinou dočasné a pulsující. Čím je tkáň tekutější, tím jsou kaverny větší (Li et al., 2001).

Ranný kanál s trvalou dutinou je svým tvarem, rozměry i orientací v tkáni individuální u každé pronikající střely. V měkkých tkáních jsou stěny kanálu nerovné, v kosti a chrupavčité tkáni mohou být i hladké. V biologickém vzorku obsahuje pohmožděnou tkáň, sraženou krev, popř. příměs cizích předmětů a látek vnesených do rány střelou a plyny vznikajícími při výstřelu.

Je tvořena rozdrčenou a tkání propadající nekróze. Vrstva molekulárního tkáňového otřesu - její šířka také závisí na kinetické energii střely a je charakterizována drobnými krevními výrony (Šafir & Hejna, 2010).

Střelný kanál může být přímočarý, obloukovitý nebo ohnutý pod ostrým úhlem (Planka, 2010).

- **Přímocharý kanál** - nalézáme při přímém průletu střely, jejíž pohyb nebyl ničím omezen
- **Obloukovitý kanál** - vzniká při šikmém dopadu střely na pevnou tkáň, po které se projektil sklouzne
- **Střelný kanál ohnutý pod ostrým úhlem** – vzniká nárazem projektilu na kost a následným odrazem od ní zpět do tkáně

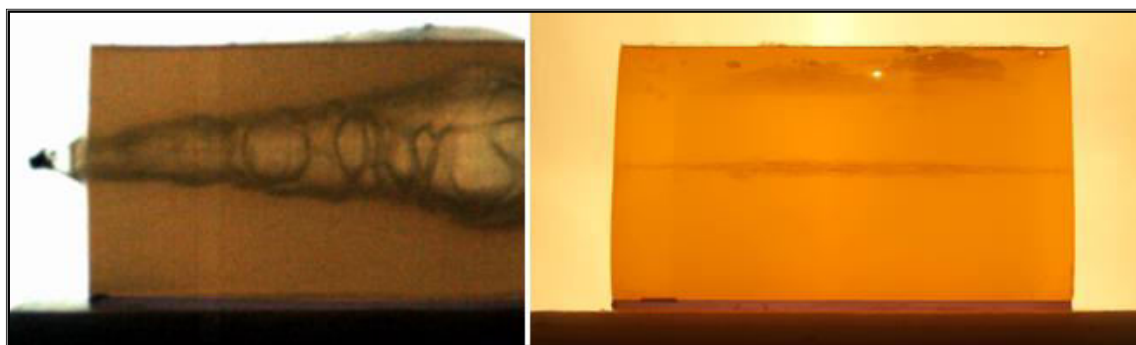


Obr. 22 Obloukovitý kanál v bloku mýdla (Planka, 2010)

Dle Planky (2010) platí, že se průměr střelného kanálu trychtýřovitě rozšiřuje ve směru letu střely nabalováním tkáňových částic; jen v kostech zůstává střelný kanál jako otvor, v jiných orgánech je většinou vyplněn tkáňovou drtí.

Z mechanického hlediska vzniká po průletu projektilu nejprve pulsující tzv. **dočasná dutina**, která se ustálí a přejde v **dutinu trvalou**. Po útlumu radiálních pulzací dočasná dutina vzniká konečný ranný kanál. Tyto radiální pulzace mají za následek zvýšení stupně poškození použitého materiálu (lidských tkání).

Patologické změny v orgánech a jejich tkáních (zhmoždění, roztřepení, roztržení event. zhmoždění a roztržení cév a nervů, fisur, abrazí či fraktur kostí) byly zjištěny při střelných poraněních velmi rychlými střelami i na vzdálenost několika centimetrů od střelného kanálu. Pojmem "**Narrow Channel**" se označuje část kanálu, kde se střela ještě pohybuje stejnou rychlostí a směrem.



Obr. 23 Dočasná (vlevo) a trvalá dutina (vpravo) v bloku (NM) balistická želatina [experimentální data]

Výsledný ranivý efekt nezáleží jen na rychlosti dopadu střely a její hmotnosti, tedy dvou základních determinantách kinetické energie, ale je podmíněn širším okruhem proměnných:

Z pohledu střely se jedná o tyto parametry dle Šafra a Hejny, 2010:

- rychlost střely
- ráž střely (resp. příčný průřez střely)
- hmotnost střely
- tvar střely
- materiál střely
- konstrukce střely
- úhel dopadu střely
- stabilita střely

Z pohledu cílové tkáně se jedná o následující parametry

- elasticita tkáně
- viskozita tkáně
- denzita tkáně
- anatomická struktura tkáně

Střelná poranění se podle příčiny vzniku dělí na **primární** a **sekundární**.

A) Primární poranění jsou vyvolána vlastními střelami, které mohou za letu nebo při dopadu na tkáň a pronikání tkání předat část své kinetické energie předmětům nebo tkáním, se kterými se setkají při svém pohybu (např. části terénu, součásti výstroje nebo oblečení, úlomky kostí i chrupavek nebo části svalové tkáně). Tyto tzv. **sekundární střely** jsou rovněž nositeli ničivé energie a způsobují další, tzv. sekundární poranění.

B) Sekundární poranění, zasažených tkání. Tento typ poranění může vzniknout rovněž po pádu zasaženého člověka na zem. 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) $600-750 \text{ ms}^{-1}$, je mechanismus vzniku poranění relativně jednoduchý. Pomalá střela zasahuje pouze ty tkáně, s nimiž přichází do bezprostředního styku (Juříček, 2017).

7.4 Výsledný ranivý účinek v tkáních

Biologický materiál má specifické vlastnosti a velmi často se chová **neNewtonovsky**. Jeho hlavní podstatou je reaktibilita prostřednictvím inervace. Poranění tkání vyvolává v organismu řadu reakcí komplexního charakteru.

Celkový ranivý účinek v tkáních je výsledkem dynamického děje, interakce střely nebo střepiny s různými tkáněmi lidského těla, a to za různých podmínek. Tento děj je komplexní a nelze jej popisovat na základě jenom např. rychlosti projektilu, intenzity kavitace nebo kinetické energie (Cooper, 1990).

V současnosti se zdá, nejdůležitější rozlišovat množství energie předané v tkáni v průběhu zraňování. Podle **množství předané energie** rozlišujeme high-energy transfer a low-energy transfer poranění, v podobě civilní traumatologie, můžeme hovořit o vysokoenergetickém a nízkoenergetickém traumatu.

V první fázi po zásahu střelou je nejzávažnější šok neurogenní, který je výsledkem reakce organismu na podráždění nervového systému (Bastos et al., 2008).

A) Neurogenní šok čím větší je dopadová rychlost na tkáň, tím větší je kaverna, tím výraznější je tlaková vlna, která postihuje tkáň v okolí a tím větší je hydrodynamický efekt, který způsobí ztlačení nervů a nervových kmenů, ochrnutí (**neurogenní šok**) nervových center mozku, okamžitou bezvládnost a při zásahu hrudních a břišních orgánů střelou obvykle okamžitou smrt. Nastupuje rychlý pokles krevního tlaku, a to i bez význačné ztráty krve. Klinicky se neurogenní šok projevuje vedle hypotenze také poklesem srdeční činnosti, bledostí a zvracením. Je-li poraněn mozek, je tep nejen pomalý, ale většinou nepravidelný a nepravidelné je i dýchání. Jestliže střela dopadne na cíl rychlostí kolem 1000 m/s a větší, vzniká velmi výrazný hydrodynamický efekt i u střel velmi malých ráží a hmotností. Ranivost těchto střel malé ráže se ještě zvyšuje jejich nestabilitou.

B) Traumatický šok je vyvolaný mimovolnou reakcí zasaženého organismu, jejímž výsledkem je nadměrné podráždění nervové soustavy, prudká deprese všech životních pochodů, velký pokles krevního oběhu, překrvení a otok jater, plic a mozku a katastrofální snížení krevního tlaku. Všechny tyto změny jsou provázeny okamžitou ochablostí svalstva. Smrt způsobená traumatickým šokem přichází o něco později, ale rychle. Její bezprostřední příčinou je nedostatek kyslíku v mozku vyvolaný přerušением krevního oběhu.

C) Poranění svalů a rozvrat lokálního metabolismu - Střelné poranění vede k lokálnímu metabolickému rozvratu v kosterních svalech v okolí střelného kanálu. Součástí traumatického šoku je tzv. **hypovolemický** - krvácivý šok, který vznikl při nadměrných krevních ztrátách poraněním velkých cév a krevnatých orgánů. **Hypovolemie** markantně zhoršují metabolický rozvrat v okolí střelného kanálu, objemové náhrady mají v experimentu reverzibilní efekt na úpravu metabolismu způsobeném hypovolemií. Hladiny laktátu a glukosy byly zvýšeny ve všech zónách, ale

G6P (glucosa-6-fosfát) byla snížena v zónách kolem střelného kanálu ukazující na probíhající **anaerobní metabolismus cukrů** a porušenou utilizaci glukosy (Almskog et al., 1982). Lidský organismus v reakci na trauma vede ke zvýšené leukocytose v periferní krvi a dochází i ke zvýšenému vyplavování polymorfonukleárních leukocytů. Další vitální známkou poranění je tvorba trombů tj. zažíva vznikajících krevních sraženin.

D) Hydrodynamický efekt je důsledkem rázového šíření hydrodynamického tlaku ve větších cévách, v mízním systému a vůbec ve vodou bohatých tkáních, jež jsou v relativně pevnějším obalu. Střela pronikající do hloubky roztrhá čistě mechanicky části těla, které před ní leží. Tkáň je při zásahu střely s velkou dopadovou rychlostí ve značné míře rozmačkaná. Vzniká **rázová tlaková vlna**, která předbíhá střelu a působí i do stran. Na předním ogiválu střely bylo zjištěno *průřezové zatížení až 10 MPa*.

E) Septický šok vzniká při rozvinuté infekci poraněných tkání (zvláště svalstva), při vstřebávání bakteriálních toxinů nebo toxických produktů ze zničených tkání, jestliže primární chirurgické ošetření nebylo provedeno nebo nebylo dokonale zvládnuto. Přestože příčiny šoku jsou rozmanité a příčiny jeho vzniku jsou dosud předmětem studia, je klinický obraz rozvinutého šoku jasný.

Probíhá ve dvou fázích:

- **eretická fáze** traumatického šoku se vyskytuje u 10-12 % poranění provázených šokem. Nastupuje ihned po poranění a trvá krátce. Projevuje se psychickou a motorickou hyperaktivitou, bolestivostí a zvýšenou citlivostí rány a kůže, která je bledá. Krevní tlak je normální nebo zvýšený, tep je nezrychlený, dýchání zrychlené. Špatným prognostickým znamením je přetrvávání této fáze po dobu 2-3 hodin.
- **torpidní fáze** je klasickým obrazem šoku. Rozvíjí se rychle jen po větších ztrátách krve, v ostatních případech s určitým časovým odstupem po poranění.

F) Rázová tlaková vlna a její vliv na kardiovaskulární a nervový systém je popsána na experimentálních modelech. Působení rázové tlakové vlny není takového charakteru, aby vedlo ke krvácení na místech vzdálených od střelného kanálu. Bezprostřední efekt po střelném poranění byl vrchol průtoku způsobený tlakovou vlnou působící na cévní stěnu s uvolněním tonusu konstriktorů. Zvýšení krevního průtoku v poraněné končetině zřejmě následuje po poranění měkkých tkání. Lokální změny jsou následovány celkovou odpovědí organismu se **snížením krevního tlaku** bez kompenzační reakce zvýšeného srdečního výdeje (Rybeck, 2005) Balistická simulace účinků rázové vlny na cévní systém je možné studovat i na fyzikálních modelech (Juříček & Komenda, 2002).

7.4.1 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 insulínu byly intenzivnější než u nízkorychlostních poranění.

Např. celoplášťový 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 parenchymatósnních 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).

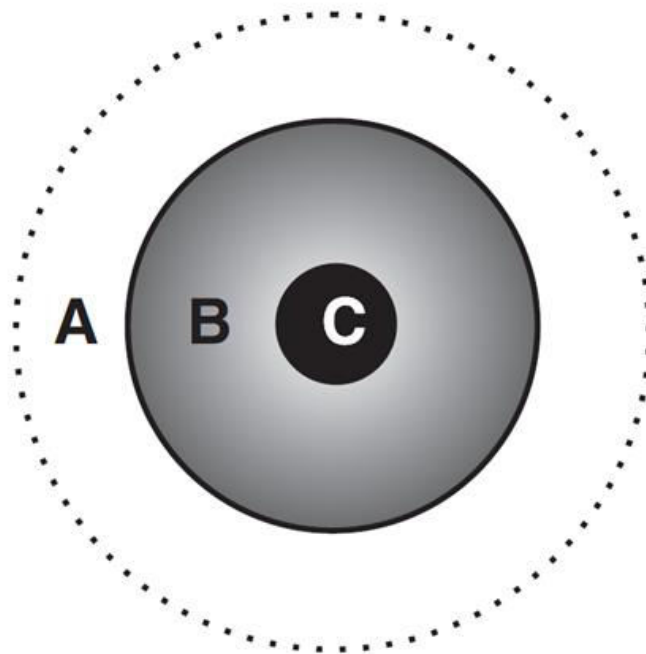
Dočasná dutina v oblasti břicha způsobuje velkou distenzi (roztažení) a náhlé snížení tlaku v břišní dutině. V důsledku toho plyn v dutých orgánech (žaludek, střevo) expanduje a může dojít k perforacím stěn těchto orgánů. Vzdálenější nervy jsou účinkem pulzací napínány a mohou dočasně ztrácet schopnost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

Při poranění nitrohruďných orgánů - konkrétně plíce, 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 - parenchymatósnní orgány jsou zraňovány vzácně, nejčastěji jde o poranění střeva, kde je popisována kontuze střevní stěny s submukózním a subserózním hemoragií, která je doprovázeno kolikovitou bolestí břicha a krvácením do traktu. Ranění jsou ohrožena 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 projektilem 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. 24 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.

7.5 Léčba střelných poranění

Zvláště mnohočetná poranění mají určitá specifika. Léčba je orientována na eliminaci čtyř výše uvedených dominantních faktorů mortality. Hlavním cílem léčby je stabilizace poraněného a jeho rychlý transport na místo odborné pomoci. Kvalita léčby se projeví zejména záchranou života postiženého, ale také celkovou dobou léčení a stupněm trvalých následků. Hodnocení poranění vojenskými zbraněmi byl vypracován systém jednotné **klasifikace střelných poranění**, na jehož tvorbě i zavedení do praxe se podíleli chirurgové *Mezinárodního červeného kříže (ICRC)*. Tento systém se používá k posuzování střelných poranění ve všech nemocnicích ICRC.

Klasifikace *dle Coupland (1991)* klade důraz na závažnost, resp. na stupeň tkáňového poškození a stav poraněných struktur. Rozhodující pro tuto klasifikaci jsou tedy klinické příznaky, nikoliv zbraň nebo předpokládaná dopadová rychlost a konstrukční uspořádání střely, které ani nemusí být lékaři známy.

Klasifikace *Mezinárodního červeného kříže* posuzuje střelné poranění jako poškození zdraví, ne jako zbraňový fenomén. Posuzuje heterogenitu poranění podle jejich klinického významu, tedy podle ryze lékařských, nikoliv balistických hledisek.

Podle Ženevských úmluv je zakázáno používat munici, jejíž střepiny nejsou v těle zjištělné RTG paprsky.

7.6 Faktory ranivého účinku střely

Samotný termín **ranivost** je rezervován pro schopnost konkrétní střely zraňovat a závisí zejména na jejím konstrukčním uspořádání a použitých materiálech. Převážná většina střel je tvořena pouze kovovými materiály (zejména ocel, tombak a olovo), přičemž jejich účinek v cíli je zajištěn kinetickou dopadovou energií postupného a rotačního pohybu (Klein & Ferko, 2004).

Ranivý účinek střely je výsledkem okamžité náhodné souhry řady působících vlivů.

Je výsledkem práce, kterou vykonala střela v tkáni. Velikost této práce odpovídá kinetické energii střely při nárazu na tkáň a její schopnosti tuto energii tkáním předat.

Závisí na těchto základních faktorech (Juříček, 2000):

Balistických charakteristikách střely, kam patří: ráže, hmotnost, tvar, dopadová rychlost a schopnost předání energie zasažené tkáni, která je určena celkovou konstrukcí (zejména její schopností se deformovat a pevností) a její stabilitou při pronikání tkáněmi;

Vlastnostech cíle, k nimž patří:

- **druh zasažené tkáně**, její fyzikální vlastnosti - struktura, hustota, hmotnost, mechanická pevnost, elasticita, obsah vody, vzduchu a fyziologický stav
- **odolnost a velikost cíle**, které jsou do značné míry ovlivněny, jeho ochranou a krytím
- **celkový fyzický a psychický stav člověka** - únava, strach, motivace, agresivita, odolnost a vnímavost k poranění

7.7 Složky ranivého účinku

Střela může působit na tkáň různými způsoby a může tak vyvolat několik možných vzájemných nezávislých ničivých účinků. Podle praktického dělení Bílý (1983) může střela působit: průbojným účinkem, tříštivým a trhavým účinkem, střepinovým účinkem a sekundárním (**sekundárním účinkem** může být mechanické poškození organismu, poškození hydrodynamickým efektem, traumatický a neurogenní šok, porážející nebo zastavující efekt a následný účinek).

Ranivý účinek je výsledek komplexního působení těchto složek:

- průbojného účinku
- tříštivého a trhavého účinku
- střepinového účinku a účinku sekundárních střel

7.7.1 Průbojný účinek

Průbojný účinek je obecně chápán schopností střely pronikat do určité hloubky v překážce. Z vojensko-technického hlediska můžeme průbojnost střely definovat celkovou hloubkou vniku v překážce určitých vlastností, po jejímž překonání se střela zastaví. Schopnost střely pronikat překážkou je dána jejími balistickými a konstrukčními charakteristikami a vlastnostmi pronikané překážky (Klein & Ferko, 2004).

Vedle hmotnosti střely (m_p), její dopadové rychlosti na cíl (v_b), balistické stability a konstrukční pevnosti jejího těla, má na průbojný účinek vliv také **odpor prostředí** překážky proti vnikání střely. Velikost odporu prostředí vedle jeho mechanických vlastností (pevnost v tahu a smyku) také výrazně ovlivňuje **příčný průřez** pronikající střely. Tato skutečnost je vyjádřena pomocí **průřezového zatížení střely** (C_p), které se vedle ráže a hmotnosti střely řadí k jejím základním konstrukčním charakteristikám. To znamená, že při stejné **dopadové rychlosti** (v_d) a **hmotnosti** střely (m_p) bude mít větší **průbojný účinek** střela s větším **průřezovým zatížením** (C_p), tedy střela menší ráže (Juříček, 2000).

Podstata ranivého účinku při průbojném působení střely spočívá v poškození nebo nezvratném zničení jen těch tkání a vitálních orgánů uložených v hloubce, které leží v dráze pronikající střely nebo s ní bezprostředně souvisí. Dochází k němu při relativně nižších dopadových rychlostech stabilních, nedeformovaných nebo málo se deformujících střel. Vedle hloubky proniku střely v tkáních, která je důležitým údajem pro střelná poranění hrudníku nebo břicha při účasti paže, je pro ranivost probíjející střely nutné zahrnout i příčný průřez střelného kanálu. Při stejné hloubce proniku, bude mít za jinak stejných podmínek větší ranivý účinek střela větší ráže, neboť vytvoří střelný kanál o větším průřezu a poraní tak větší objem tkání. Téměř všechny dnes používané střely vytváří v tkáních trvalou dutinu o průměru 1,5 až 2 ráží (Juříček, 2017).

Kvantitativním ukazatelem ranivého účinku při průbojném působení střely je objem střelného kanálu (V), který v sobě zahrnuje jak plochu příčného průřezu kanálu, tak i hloubku vniku střely. Průbojný účinek střely tedy roste jak s hloubkou vniku (s), tak se čtvercem její ráže (d^2).

Velikost průbojného účinku závisí převážně na hmotnosti a pevnosti střely a na její dopadové rychlosti. Každá střela, pokud nezpůsobí dostatečný hydrodynamický efekt, musí mít průbojnost, která zabezpečí proniknutí střely do životně důležitých orgánů těla a jejich rozrušení. V okolí střelného kanálu jsou tkáně poškozeny bezprostřední traumatickou nekrosou, ischemií a v oblasti molekulárního otřesu traumatickým otokem, sníženou odolností vůči infekci, poškozením endotelu a dystrofickými změnami buněk.

Střely relativně velkých ráží a tedy i hmotností, mají s ohledem na vnitrobalistické podmínky a konstrukční možnosti střelné zbraně menší počáteční a

zpravidla i dopadové rychlosti. V praxi proto mají při průbojném působení sice velký ranivý účinek, ale menší absolutní průbojnost.

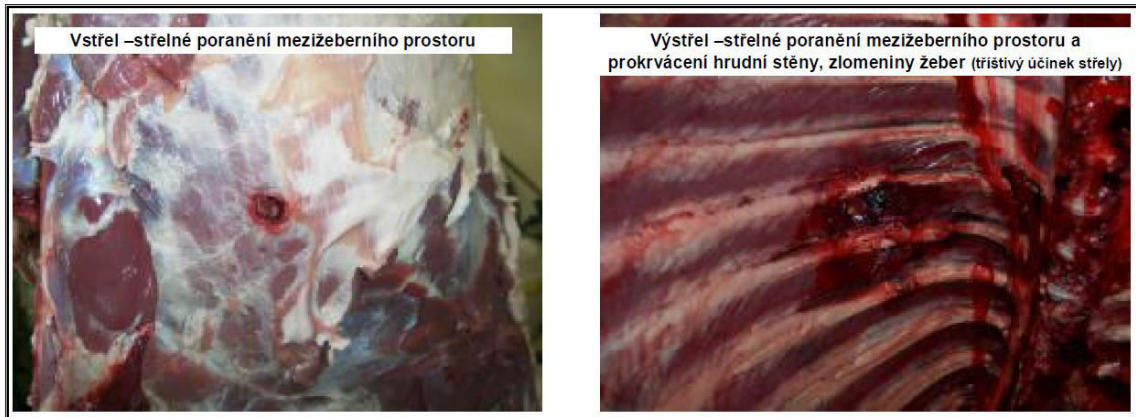
7.7.2 Tříštivý a trhavý účinek

Tříštivo trhavý účinek rozlišujeme podle toho, v jaké části těla zvíře střela proniká. Tříštivý účinek vzniká při styku střely s kostí, při styku se svalovou částí těla nebo měkkými částmi tkání vzniká trhavý účinek. Mez vzniku tříštivého nebo trhavého účinku závisí na odporu, který klade střele prostředí a na jeho pevnosti a deformačních schopnostech.

Dojde-li v takovém případě k úplnému průstřelu určité části těla, vyznačuje se výstřel velkými rozměry se značným objemem vytržených tkání. Konkrétní střelná poranění ukazují, že vlivem tříštivého a trhavého účinku dochází k rozsáhlým **devastacím tkání** a v případě zasažení končetiny některou z výkonných střel o vysoké ranivosti, může dojít i k její **amputaci**. Tato těžká poranění mají často za následek smrt, ačkoli nebyly střelou přímo zasaženy životně důležité orgány.

Pokud jsou zasaženy tkáně bohaté na vodu, má účinek střely charakter hydrodynamického proniku. Přenos energie odevzdané střelou na okolní tkáně v důsledku nehomogenity organismu člověka není rovnoměrný. Kdyby se tkáně chovaly jako ideální kapalina (absolutně nestlačitelná), uložená v pevném obalu, rozšířil by se tlak vznikající na špičce pronikající střely okamžitě v celém jejím objemu a došlo by při jakémkoli zásahu střelou k vyřazení tohoto typu cíle. Ve skutečnosti je nestlačitelnost tkání pouze relativní a jejich obal (fascie nebo kůže) je značně pružný. Proto se vznikající tlak vyrovnává deformacemi okolních tkání. Jestliže hodnota tlaku působícího na tkáně a orgány přesáhne mez jejich pevnosti, dochází k jejich destrukci a to do takové vzdálenosti od střelného kanálu v radiálním směru, která je úměrná působícímu tlaku a vlastnostem zasažených tkání (Juříček, 2000).

Odpor, který klade střele prostředí, ovlivňuje rychlost střely při dopadu na cíl, její energie, ráže střely, hmotnost, poměr hmotnosti střely k rychlosti šíření zvuku v daném prostředí a další činitelé. Odpor prostředí se zvětšuje s větší pevností prostředí, s větší rychlostí a ráží střely, je větší u nestabilních, ale i nestabilizovaných střel a snadno deformovaných střel.

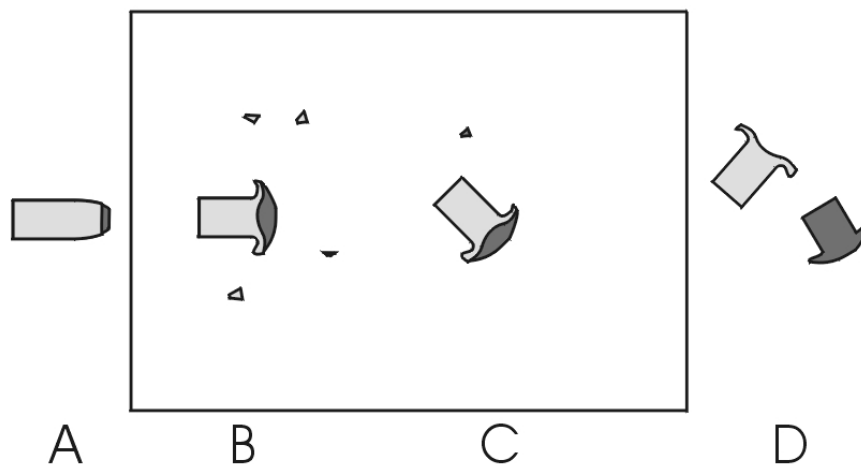


Obr. 25 Ukázka tříštivého účinku střely na zvířecím vzorku (vysoká zvěř) (Bílý, 2000)

Nejvýznamnější z těchto činitelů jsou dopadová rychlost střely, její ráže a deformační schopnost. Ztráta stability střely při pronikání tkáně vede ke značnému devastujícímu účinku na tkáň a blíží se **účinku výbušné střely**. Ztráta stability úpravou konstrukce a geometrie vnějšího tvaru střely využívá střelivo vyvíjené španělskou organizací **CETME** (Komenda & Malánek, 2002).

7.7.3 Střepinový účinek

vzniká, když při průniku střely prostředím působí na střelu síla odpor, která je větší než mez dynamické pevnosti střely. V takovém případě se střela roztříští obvykle uvnitř těla zvěře např. při nárazu na kost. Každá střepina působí pak vlastní energií často ve směru zcela rozdílném od původního. Velký střepinový účinek mají náboje s dutou špičkou, zvláště s nekrytou. Jako střepinový účinek se ve forenzní medicíně uvádí i účinek jednotlivých kostních fragmentů vzniklých při zlomenině kosti vedoucí k samostatným poraněním.

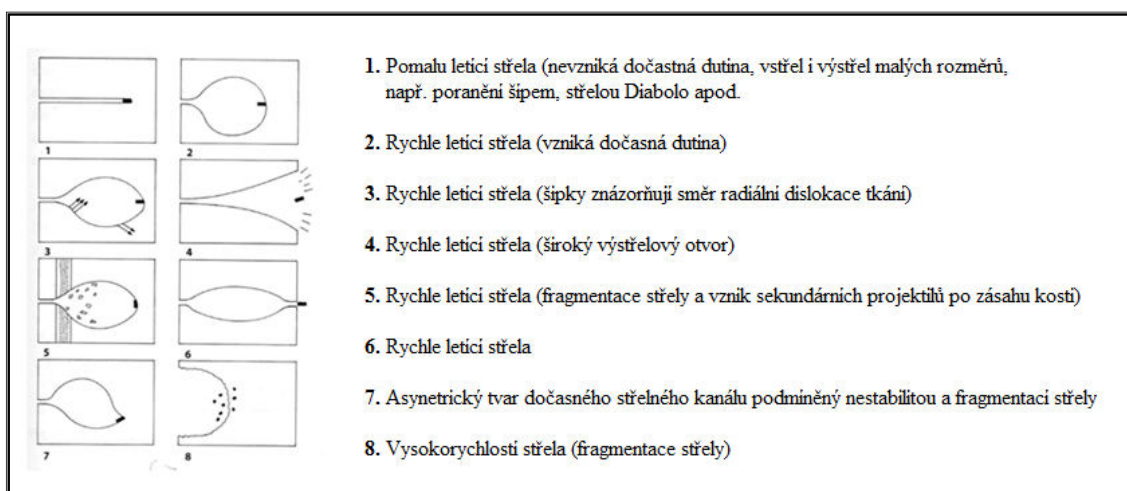


Obr. 26 Fragmentační nomenklatura: A - střela před dopadem B - deformace střely s různým stupněm fragmentace C - pronikání kulky materiálem a její rotace D - výlet náboje jenž se separoval na 2 části (jádro, plášť) (Jusilla, 2005)

Poznámka: Rozdělení jednotlivých částí náboje může probíhat i uvnitř náhradního materiálu

Ranivý účinek střely může být zvýrazněn její případnou deformací, fragmentací, nestabilitou a případným kontaktem s kostěnou tkání.

- **Deformace** pronikající střely zvyšuje výsledný povrch jejího čelního profilu, a tím se snižuje její průřezové zatížení. Lovecké střely jsou často konstruovány tak, aby při zásahu cíle prodělávaly řízenou deformaci, která snižuje jejich průřezové zatížení a tím také průbojnost, při současném zachování maxima kompaktnosti a hmotnosti střely. Zvyšuje se tím odpor materiálu cíle proti průniku střely a střela tak předá cíli svoji energii (Šafr & Hejna, 2010).
- **Fragmentace** viz *střepinový účinek střel*
- **Nestabilita** střely může snížit průřezové zatížení střely, kdy střela může tkání procházet na koso, event. i obráceně, přičemž vodící částí není její špice, ale báze. Tento fenomén výrazným způsobem zvyšuje podíl kavitace na výsledném ranivém účinku střely (Šafr & Hejna, 2010).



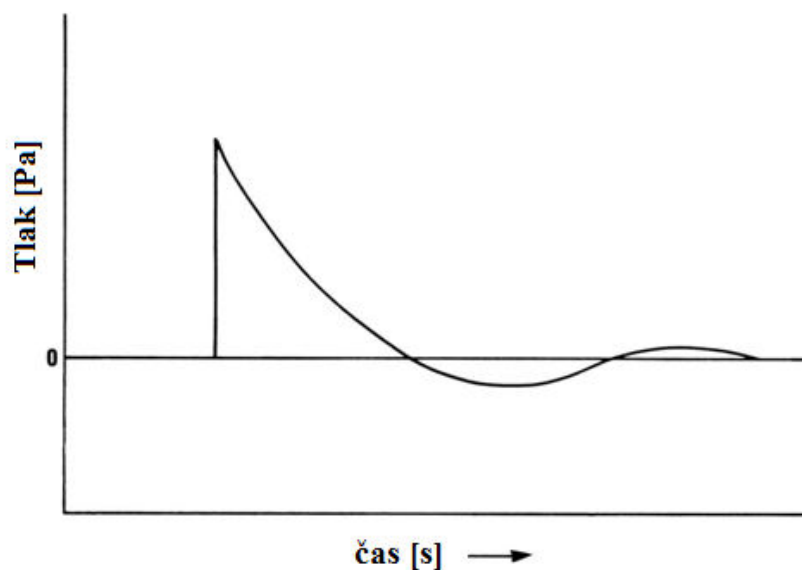
Obr. 27 Balistický účinek střel různých rychlostí na tkáň (Šafr & Hejna, 2010)

Nejúčinnějšími sekundárními střelami jsou úlomky kostí, jejichž působení lze přirovnat ke střepinovému účinku střely (Juříček, 2017).

7.8 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 tkáň a nervově-cévním řečištěm. Mechanismus poškození tkáň 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).



Obr. 28 *Poranění tlakovou vlnou - Idealizovaný graf tlakové vlny vzniklé při výbuchu v průběhu času (Sasser, 2006)*

Poranění vzniklá v souvislosti s blast efektem můžeme rozdělit:

- **primární** - jde o poranění způsobená tlakovou vlnou a postihující hlavně orgány s obsahem vzduchu, tj. plíce, trávicí trubici, střední ucho, ale také orgány solidní
- **sekundární** - jde o poranění způsobená střepinami, které jsou uvedeny do pohybu explozí
- **terciární** - tato poranění vznikají v důsledku prudkého toku vzduchu, výsledkem může být traumatická amputace, zlomeniny, pohmožděny např. nárazem těla na tvrdou podložku
- **popáleniny ožehem** - vzniklé v důsledku exploze plynů
- **crush poranění** - vzniklé např. zřízením budov

Charakter poranění je závislý na:

- **velikosti nálože** a vzdálenosti raněného od epicentru exploze - směr od epicentra ubývá popálenin, primárních poranění a traumatických amputací končetin způsobených pohybem vzduchu (blast wind)
- **lokalizace exploze** v uzavřeném či ve volném prostoru - v otevřeném prostoru se tlaková vlna šíří sféricky, odráží se od země a od stojících objektů. Rychlý vrchol přetlaku trvající několik milisekund je následován kratší vlnou podtlaku a rychlou normalizací latkových poměrů. V uzavřeném prostoru se tlaková vlna odráží a ve srovnání s otevřeným prostorem dochází k prodloužení celkové doby trvajícího přetlaku. Zvětšuje se podíl primárních poranění, naopak díky překážkám klesá počet střepinových poranění (Leibovici, 1996)
- **šíření exploze vodou** - vodní blast je závažnější, více jsou zraňovány nitrobrášíšní orgány



obr. 29 *Tlaková vlna patrná při explozi (Tarasov, 2017)*

8 PRINCIPY OŠETŘENÍ BALISTICKÝCH PORANĚNÍ

8.1 Obecná charakteristika

Pojem balistické trauma zahrnuje širokou skupinu poranění způsobených projektily, střepinami, tlakovou vlnou nebo jejich vzájemnou kombinací. Zatímco v minulosti byla tato poranění většinou vázaná na válečný konflikt, dnes se chirurg stále více častěji setkává s balistickým traumatem v podmínkách mírových nebo v podmínkách mimořádných (Coupland & Meddings, 1999).

Za války je struktura zdravotnických ztrát určována způsoby vedení boje a druhy používaných zbraňových systémů. Zatímco ve válečných konfliktech v minulosti (I. a II. Světová válka) byla většina poranění způsobena projektily, v soudobých konfliktech se častěji jedná o poranění střepinová.

8.2 Principy léčby balistických poranění

Cílem léčby balistických poranění je zabránit smrti zasaženého pacienta a omezit trvalé následky. Smrtelné následky jsou za válečných podmínek nejčastěji vyvolány:

- Vykrvácením
- Poraněním vitálně důležitých orgánů
- Infekčními komplikacemi ran (anaerobní infekce)

Základní vyšetřovací zobrazovací metodou zůstává prosté RTG vyšetření, které je nutno provést u každého pronikajícího poranění – vždy ve dvou projekcích. RTG snímek podá dostatečnou informaci o **lokizaci projektilů nebo fragmentů**. Odstranění kontaminované a devitalizované tkáně je základním principem ošetřování balistických poranění. Je zřejmé, že nedostatečné odstranění mrtvé a kontaminované tkáně vede k rozvoji závažných infekčních komplikací ohrožující život raněného. Souhrnné doporučení pro ošetření měkkých tkání dle Wiedeman, 1999.

Poranění nízko-rychlostními fragmenty se vstřelem a výstřelem menším než 2 cm je možné **léčit neoperačně**. Vysokoenergetické poranění vyžaduje incizi s cílem uvolnit přetlak ve svalových kompartmentech a exploraci rány. Je doporučován velkoobjemový výplach rány, který je následován excizí mrtvé tkáně. **Antibiotika** je nutné aplikovat co nejdříve od vzniku poranění. Radikalita lokálního ošetření balistických poranění se musí opírat o identifikaci vysokoenergetického poranění a to hlavně na základě posouzení stupně závažnosti poranění tkání.

8.3 Epidemiologie úrazů

Příčiny poranění různými druhy zbraňových systémů a procentuální rozložení poranění jednotlivých tělesných oblastí závisí na způsobu taktického vedení boje a na individuální balistické ochraně (balistické vesty, přilby). Coupland (1994) hodnotil poměr raněných a usmrcených ve třech různých typech konfliktů:

- Klasický válečný
- Civilním masovém konfliktu
- Konfliktu vedenému paravojenskými oddíly

Tab. 2 Příčiny poranění v různých ozbrojených konfliktech (Klein & Ferko, 2005)

Reference	Konflikt	Země	Počet raněných	Střepinové	Střelné	Tupé	Popálení
Mabry et. al. (2002)	Somálsko 1993	USA	125	31 %	55 %	12 %	2 %
Carey (1996)	Irák 1991	USA	143	95 %	5 %		
Burke. et. al. (1994)	Irák 1991	USA	402	84 %	10 %		
Prgomet. et. al. (1999)	Irák 1991	USA	7043	71.9 %	16 %	12 %	
Hodalič, et. al. (1999)	Chorvatsko 1991-1993	Chorvatsko	1211	94 %	3 %		2.0 %
Gofrit, et. al.	Libanon 1982	Izrael	405	71 %	29 %		
Mabry, et.al (2000)	Vietnam 1965 - 1972	USA			48 %	30 %	

Srovnával poměr raněných a usmrcených a zjistil, že mezi jednotlivými typy konfliktů jsou významné rozdíly (*tabulky č. 2, 3*). Tomuto aspektu je nutné přizpůsobit také charakter a činnost chirurgického týmu.

Tab. 3 Zranění v různých ozbrojených konfliktech podle lokalizace (Klein & Ferko, 2005)

Reference	Konflikt	Země	Končetiny	Hrudník	Břicho	Pánev	Hlava/Krk
Mabry, et. al. (2002)	Somálsko 1993	USA	7.0 %	14.0 %	20 %	14 %	43.0 %
Carey (1996)	Irák 1991	USA	90.0 %	5.8 %	9.3 %		21.6 %
Burke. et. al (1994)	Irák 1991	USA					
Prgomet. et. al. (1999)	Chorvatsko 1991-1993	Chorvatsko		24.1 %	9.2 %		40.0 %
Hodalič, et. al. (1999)	Slovinsko 1991-1992	Slovinsko	45.0 %				38.0 %
Gofrit, et. al.	Libanon 1982	Izrael	23.8 %		45.0 %		31.2 %
Mabry, et.al (2000)	Vietnam 1965 - 1972	USA	7.0 %	38.0 %	9.0 %	2 %	43.0 %

8.4 Souhrn

Ošetřování balistického poranění vyžaduje základní znalosti ranné balistiky. Primární ošetření a přístup k nemocnému jsou závislé na podmínkách, za kterých zranění vzniklo. Chirurgické ošetření se má řídit zásadou „*treat wound, not weapon*“ tj. léčit ránu ne zbraň. Úvahy nad tím, zda projektil měl rychlost vysokou nebo nízkou, mohou být na škodu. V praxi to znamená, že chirurg se při ošetřování balistického poranění musí řídit celkovým stavem nemocného, charakterem rány a rozsahem devastace tkání.

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

9.1 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 **artifciálních 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).

9.2 EXPERIMENTÁLNÍ METODY ZKOUMÁNÍ ÚČINKŮ STŘEL

9.2.1 Postřelování umělých materiálů

9.2.1.1 Postřelování zvířat

Složitost všech experimentů se zvířaty spočívá v extrapolaci takto získaných výsledků na člověka, neboť nakonec naše poznání musí být založeno na studiu jeho chování, které je ovlivněno účinkem střelby. Pro splnění požadovaného experimentálního cíle, kterým je co možná nejpřesnější extrapolace výsledků, musíme zvolit takový druh zvířete, které je z hlediska velikosti, stavby a rozmístění tkání a vitálních orgánů, člověku nejbližší (Klein & Ferko, 2005).

Při použití laboratorních zvířat v experimentu reguluje *zákon č. 246/1992 Sb.* na ochranu zvířat proti týrání. K balistickému postřelování se používají velká laboratorní zvířata - skot, kozy, ovce, psi, přičemž za nejvhodnější se považuje prase domácí (Sellier & Kneubüehl, 1992).

Prasata - se dají snadno chovat v požadovaných velikostech za rozumné ceny. Také při střední velikosti (asi 30 kg) je možné v jejich svalstvu dosahovat dostatečně dlouhé střelné kanály. Je nutné přihlížet k tomu, že zvířata této hmotnosti jsou ještě

mladá s odpovídající mladou kostní stavbou a strukturou svalových tkání (Sellier & Kneubüehl, 1994).

Na rozdíl od psů jsou u prasat složitější odběry krve nebo jejich uvedení do anestezie. U prasat jsou lehce přístupné periferní žíly pouze na vnější části ušního boltce. Kůže u většiny druhů prasat není pigmentována a dosahuje jen malé hustoty štětín, střelná poranění jsou proto dobře patrná a posuzovatelná. Přes uvedené nevýhody, na rozdíl od psů, je prase (neuvažujeme-li ovšem člověka) nejvhodnějším živým biologickým objektem pro balistické postřelování (Juříček, 2000). Chceme-li zkoumat průbojný účinek střely sledováním délky střelného kanálu, musí pokusné zvíře odpovídat tomu svou velikostí.

9.2.1.2 Postřelování izolovaných vitálních orgánů zvířat

Na rozdíl od pokusů na živých zvířatech, která se nacházela v anestézii, je nutné k provedení těchto střeleckých experimentů vybraná zvířata před operativním vyjmutím jejich orgánů intravenózně podaným anestetikem usmrtit (Juříček, 2013).

K experimentálnímu zkoumání účinku střel malých ráží na vitální orgány jsou nejčastěji voleny ledviny, plíce a játra psů nebo prasat. Postřelování volně zavěšených izolovaných orgánů probíhá za 20 až 24 hodiny po jejich vyjmutí z těla zvířete. Na tuto dobu musí být orgány uloženy v termoboxu s ledem. Poraněné orgány po provedené střelbě musí být nejprve makroskopicky prohlédnuty a po jejich uložení do formalínu běžným způsobem histologicky zpracovány (Beneš, 1974).

9.2.1.3 Postřelování lidských mrtvol

Lidské mrtvoly mohou být velmi dobrým modelem ke studiu mechanických procesů probíhajících v lidském těle při jeho zasažení malorážovou střelou. Protože se s narůstajícím stářím mrtvol mění biologické a fyzikální vlastnosti tkání (nižší obsah vody a zvýšená tuhost tkání), musí se k pokusům používat co možná čerstvé mrtvoly. Často jsou konzervovány a experimentálně využívány pouze části mrtvol (Juříček, 2013).

Měkké tkáně (svalstvo, tuk, vnitřní orgány) před postřelováním jsou temperovány na teplotu těsně nad bodem mrazu, protože teplota těchto tkání v balistickém experimentu hraje významnou roli (Juříček, 2000).

Přestože pomocí pokusů na mrtvolách **nemohou** být přirozeně postihnuty **fyziologické reakce člověka** na zásah malorážovou střelou, tvoří mrtvola z hlediska vlastností a uspořádání tkání a vitálních orgánů nejvěrnější biologický model člověka. Postřelování kadeverů v balistickém experimentu bylo příznačné pro počátek minulého století (Klein & Ferko, 2005).

9.2.1.4 Experimentální využití buněčné kultury

V současné době je evidentní snaha vyhnout se pokusům na zvířatech. Pro některé typy zkoušek se s úspěchem používají buněčné kultury, které byly v minulosti

využity ve farmaceutickém průmyslu. V ranivé balistice byly buněčné kultury použity Sunesonem (1987), který zkoumal účinky rázové vlny na chování buňky.

9.2.1.5 Experimentální parametrizace hloubky vniku střely ve dřevě

Základním technickým problémem ranivé balistiky je kvantitativní popis mechanických a fyzikálních vlastností biologického cíle typu nechráněná živá síla, které determinují jeho odolnost proti účinkům malorážových střel. První s **myšlenkou měření hloubky vniku střely** ve dřevě, jako kritéria účinnosti střely přišel Wolfgang WEIGEL (1975). Svými experimenty prokázal, že biologický účinek malorážové střely je úměrný objemu střelného kanálu vytvořeného touto střelou ve dřevě. K tomu použil jako první modelovou substanci, suché bezsukové jedlové dřevo. Dřevo nepředstavuje z hlediska obsahu vody, tvrdosti a směru vláken homogenní prostředí. Rozdíly v jeho mechanických vlastnostech mají zásadní vliv na odpor proti pronikání a tím i hloubku vniknutí střely. Srovnání hloubek vniknutí střely do dřeva a svalové tkáně, je velmi problematické (Juříček, 2000).

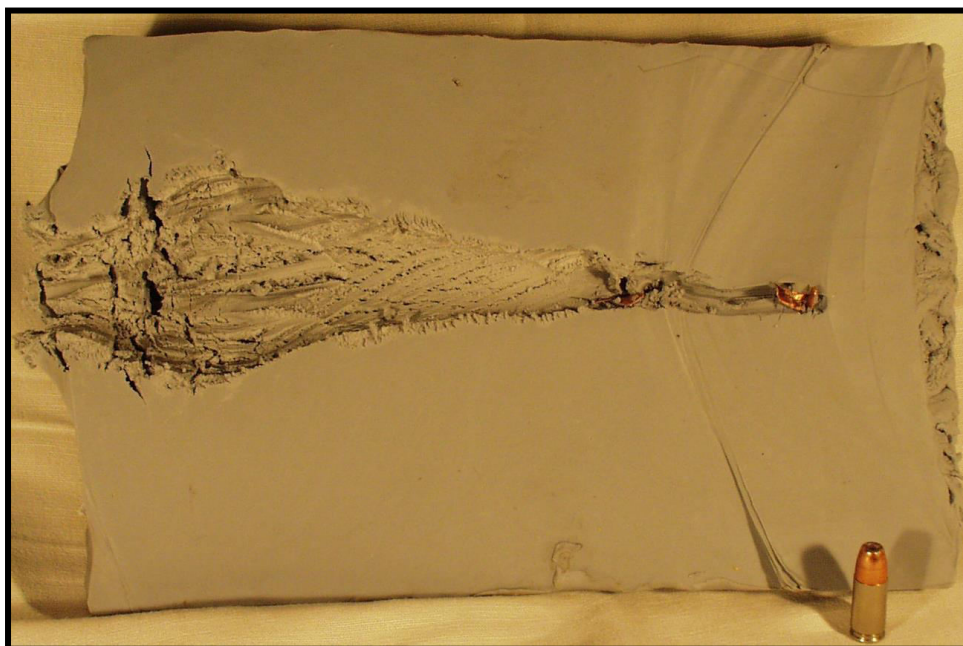
9.2.1.6 Postřelování hlíny

Hlína stejně jako jedlové dřevo, je cílový heterogenní materiál, jehož chování silně závisí na jeho složení a obsahu vody. Experimenty s hlínou se proto dají použít jen ke **vzájemnému srovnání účinků střel** při známých vlastnostech (hustota, zrnitost, obsah vody, plasticita apod.) každého použitého hliněného bloku. Archivace výsledků postřelování je však obtížná (Klein & Ferko, 2005).

Autoři Caranta a Legrain (1979) sestavili nejprve rozšířené vojenské kritérium dostatečného účinku vojenského střeliva. Pro rozlišení účinných a neúčinných střel, při použití hlíny jako cílového média, stanovili Caranta a Legrain minimální objem v hlině vytvořené dutiny rovný 0,60 l (Sellier & Kneubuehl, 2011). Souvislost mezi velikostí objemu dutiny v hlině a hloubkou vniknutí do jedlového dřeva jako kritérií účinnosti střel malých ráží, zůstává zatím neobjasněna.

9.2.1.7 Využití plastelíny v balistickém experimentu

Plastelína, jako náhradní materiál biologické tkáně, se k přímému postřelování za účelem zkoumání ranivosti malorážových střel, používá jen výjimečně. Pro svou výraznou plasticitu, která je ještě vyšší než u mýdla nebo směsi petrolátu a parafínu 75/25, se postřelování plastelíny používá za účelem zjišťování celkového objemu dočasné dutiny, který je kritériem účinnosti zkoumaného malorážového střeliva. Ve světě, ale i u nás se plastelína používá především ke zkouškám odolnosti ochranných prostředků před účinky střel, střepin a bodných zbraní.



Obr. 30 Podélný řez blokem standardní plastelíny (modelovací hmota šedá) v místě střelného kanálu. Na obrázku je vidět typický tvar dutiny střelného kanálu vytvořeného v plastelině expanzní střelou pistolového náboje ráže 9 mm (Juříček, 2013)

9.2.2 Postřelování moderních náhradních materiálů

Při konstrukci nových typů střel, nebo při jejich testování či zjišťování ranivého účinku se využívá náhradních materiálů. Lidské tkáně a živé organismy vůbec jsou velmi složité a mají těžko předvídatelné chování.

Složitost procesů souvisejících s interakcí střely a tkání je patrná z praktických zkušeností, které ukazují na to, že střela s menší dopadovou rychlostí může dosáhnout většího účinku v cíli, než podobná střela stejné ráže s vyšší dopadovou energií.

Pro svou jednoduchost a v mnoha případech dostatečnou přesnost se osvědčily metody **měření hloubek vniknutí střely** do různých pevných materiálů ale také nejrozumnějších plastických médií, která se svými fyzikálními a balistickými vlastnostmi blíží vlastnostech biologických tkání. Tyto metody jsou vhodné nejen k pouhému srovnání účinků zkoumaných střel podobných balistických vlastností a konstrukčního uspořádání, ale rovněž ke stanovení očekávaného účinku střely na živou sílu, aniž bychom museli vystřelit na živého tvora.

Moderní experimentální metody používané v ranivé balistice jsou založeny na využití zkušebních "terčů" vyrobených z plastických resp. pružně plastických náhradních materiálů (Juříček, 2017).

Z četných pokusů, prováděných v mnoha zemích, se ukázaly jako nejvhodnější k simulaci měkkých tkání dva materiály, které se dodnes široce používají. Jedním z nich je želatina určité pevnosti, koncentrace a teploty, druhým glycerinové mýdlo, připravené podle přesně stanoveného postupu. Kromě vody tyto hmoty obsahují organické látky (tuky a alkoholy v mýdle a bílkoviny v želatině). Jejich hustota přibližně odpovídá hustotě biologických tkání (svalstvu).

Tab. 4 Fyzikální a mechanické charakteristiky náhradních materiálů živé tkáně (Sellier & Kneubüehl, 2001 in Juříček, 2010)

Látka	t	ρ	κ	η	ν	c
	$^{\circ}\text{C}$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{l} \cdot \text{Pa}^{-1}]$	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
Voda	20	988	$4.6 \cdot 10^{-10}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	1483
	0	1000	$5.1 \cdot 10^{-10}$	1.8	$1.79 \cdot 10^{-3}$	1403
Glycerín	20	1260	$2.2 \cdot 10^{-10}$	1.48	$1.17 \cdot 10^{-3}$	1923
	0	-	$1.2 \cdot 10^{-9}$	-	-	-
Ethanol	20	789	$9.3 \cdot 10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.52 \cdot 10^{-6}$	1170
	0	806	$10.2 \cdot 10^{-10}$	-	-	1100
Mýdlo (GM)	20	1080	$3.4 \cdot 10^{-10}$	$\approx 5 \cdot 10^{-3}$	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$	1660
Želatina	20	1030	$4.2 \cdot 10^{-10}$	≈ 40.0	≈ 0.04	1520
10 % (Ž-10)	4	-	-	-	-	1486
Želatina	20	1060	$3.8 \cdot 10^{-10}$	$\approx 1 \cdot 10^2$	≈ 0.1	1567
20 % (Ž-20)	0	-	-	-		1541
PP 75/25	20	910 - 940	-	$\approx 11 \cdot 10^{-3}$	-	-
Plastelína (PL)	25	1710	-	$\approx 14 \cdot 10^{-3}$	-	-
Vzduch	0	1.23	$7.4 \cdot 10^{-6}$	$1.72 \cdot 10^{-5}$	$1.33 \cdot 10^{-5}$	331

Legenda: T – teplota; ρ – hustota; κ - stlačitelnost; η - dynamická viskozita; ν – kinematická viskozita; c – rychlost zvuku, želatina 20 % roztok (Ž-20), želatina 10 % roztok (Ž-10), glycerinové mýdlo (GM), plastelína (PL)

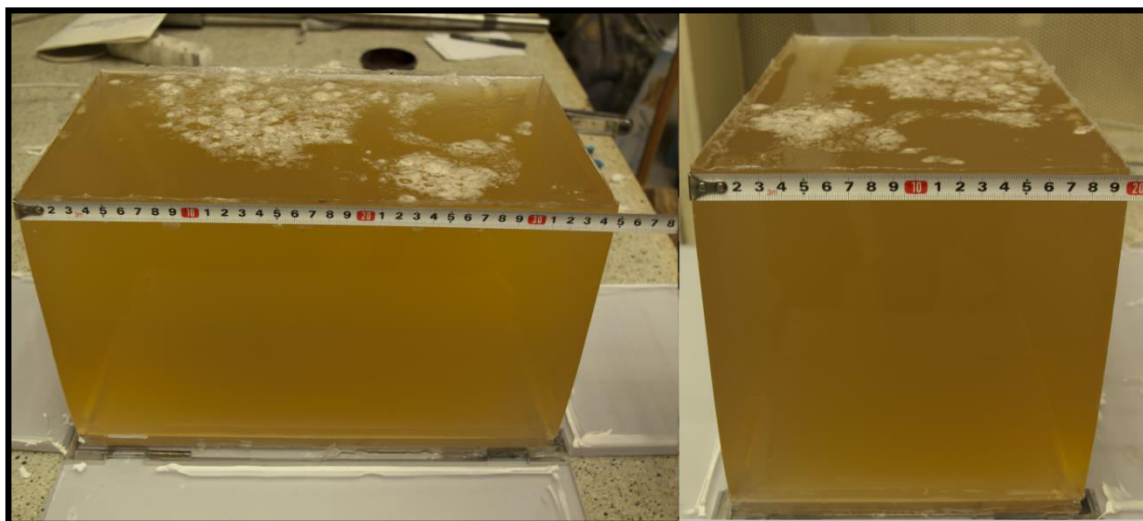
Experimentálně získané charakteristiky popisující proces pronikání střely (střepiny) do bloků náhradního materiálu se staly základem pro odvození **nejrůznějších kritérií a metodik hodnocení účinků** malorážových střel na živou sílu. Jednotlivými

kritérii hodnocení účinků střel, spolu s jejich vzájemným srovnáním se zabýváme v kapitole č. 10.

9.2.3 Chování střely v balistické želatině

Želatina je protein ireverzibilní (nevratné) povahy. Vyrábí se z kůže, kostí nebo šlach zvířat. Firmy, zabývající se výrobou želatiny, své receptury přísně tají. Je-li želatina podrobena zatížení, odvodňuje se. Pevnost želatinového gelu závisí na koncentraci a také na teplotě. Pevnost želatinového bloku závisí na jeho koncentraci a také na teplotě. Tuto pevnost lze rovněž vyjádřit hodnotou *limitní rychlosti* v_{lim} pro její vnik do želatinového bloku.

K experimentálnímu postřelování se z připravené želatiny odlévají bloky o rozměrech 15x15x15cm (*Dynamit Nobel AG*), 15x15x35cm (*W.Weigel*) nebo 25x25x50cm (*Knappworst, Fackler*). Teploty, při kterých jsou bloky postřelovány, jsou 4 °C (*Fackler*), 10 °C (*NATO*) nebo 15 °C (*Dynamit Nobel AG*).



Obr. 31 Blok balistické želatiny, po vyjmutí z předpřipravené formy o rozměrech 20x20x35cm [experimentální data]

Používané **koncentrace želatiny** odpovídají 10 % a 20 % roztokům. 10% koncentrace želatinového roztoku se blíží svými vlastnostmi křehkým parenchymatózním tkáním (ledviny, játra, a plíce). Koncentrované želatiny (Ž-20) jsou svými vlastnostmi nejvíce podobné svalové tkáni (Juříček, 2017).

Pro zabezpečení homogenního rozložení teploty želatinového bloku v celém jeho objemu, je nutná **temperace bloků** před střelbou po dobu minimálně 12 hodin. Při použití želatiny k experimentálním účelům se musí počítat s jejím biologickým rozpadem a se **změnou fyzikálních a balistických vlastností** želatiny. Proto příprava želatiny probíhá bezprostředně před jejím upotřebením a z důvodu rychlé tvorby (3-5 dní) plísni, je archivace výsledků experimentu velmi problematická. Především velmi

vysoká závislost fyzikálních a mechanických vlastností želatiny na teplotě a její biologická nestabilita tvoří hlavní nevýhody tohoto plastického náhradního materiálu.

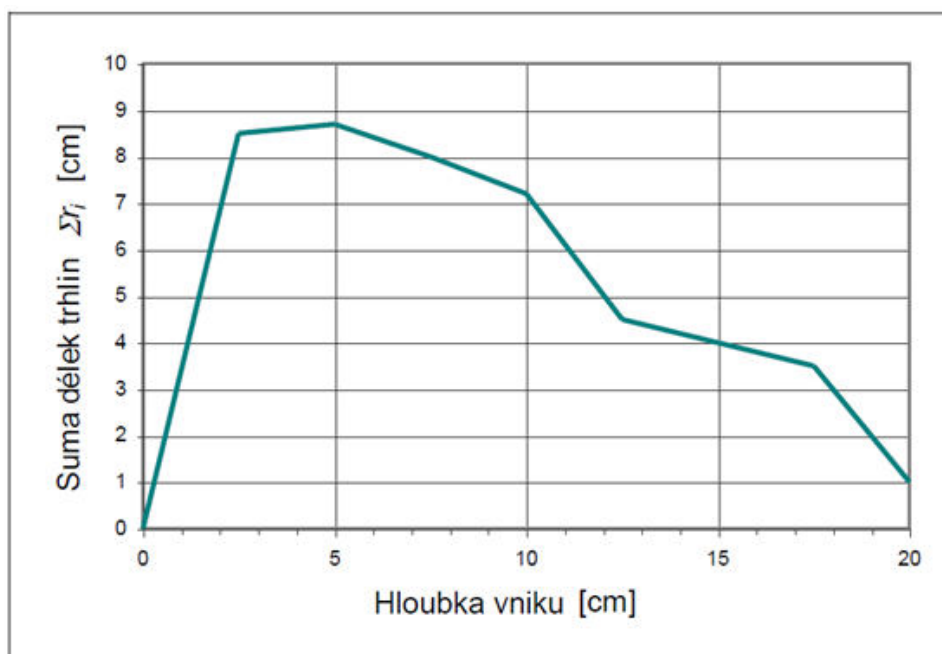
Tzv. **síla želatiny** se měří v tzv. "*Bloom*". Želatina je k dostání v silách 50 až 300 Bloom. Hodnota 300 představuje nejsilnější typ želatiny. V našich balistických experimentech byly použity želatiny typu A, které představovaly hodnotu 250 - 300 Bloom.

Síla želatiny také závisí na teplotě a koncentraci, i když v menší míře (Sellier & Kneubüehl, 2008).

S analýzou terminálně-balistických jevů v živé tkáni velmi úzce souvisí pojem profil střelného poranění (Fackler & Malinovskij, 2005), popisující maximální porušení živé tkáně, které může být od střely dané konstrukce očekáváno. Tímto profilem je třeba trvalou dutinu odlišovat od dutiny dočasné (Juříček, 2000).

Pro kvantitativní vyjádření účinku střely (tvar a velikost) v tomto prostředí byla J. Knappworstem (*Dynamit Nobel AG*) vyvinuta metoda radiálních trhlin v okolí střelného kanálu, vzniklých přenosem kinetické energie střely na pronikane prostředí.

Metoda radiálních trhlin je metodou nepřímou a spočívá ve stanovení součtů délek trhlin v přesně určených úsecích střelného kanálu. Jako výsledek je získán diagram závislosti **součtů délek trhlin** $\sum r_i$ na **hloubce vniknutí střely** l_s do želatinového bloku (*obrázek č. 32*). Je-li známá celková předaná kinetická energie střely E_{PR} želatinovému bloku, je možné tuto energii vztáhnout na jednotku hloubky vniku střely (E_{PR}/l_s).



Obr. 32 Předání energie expanzivní střely ráže 44 Magnum ($m_q= 15,6$ g, $v_d = 372$ m.s⁻¹) želatinovému bloku, vyjádřenému součtem délek radiálních trhlin $\sum r_i$ v hloubce l_s (Knappwors, 2011 in Juříček, 2013).

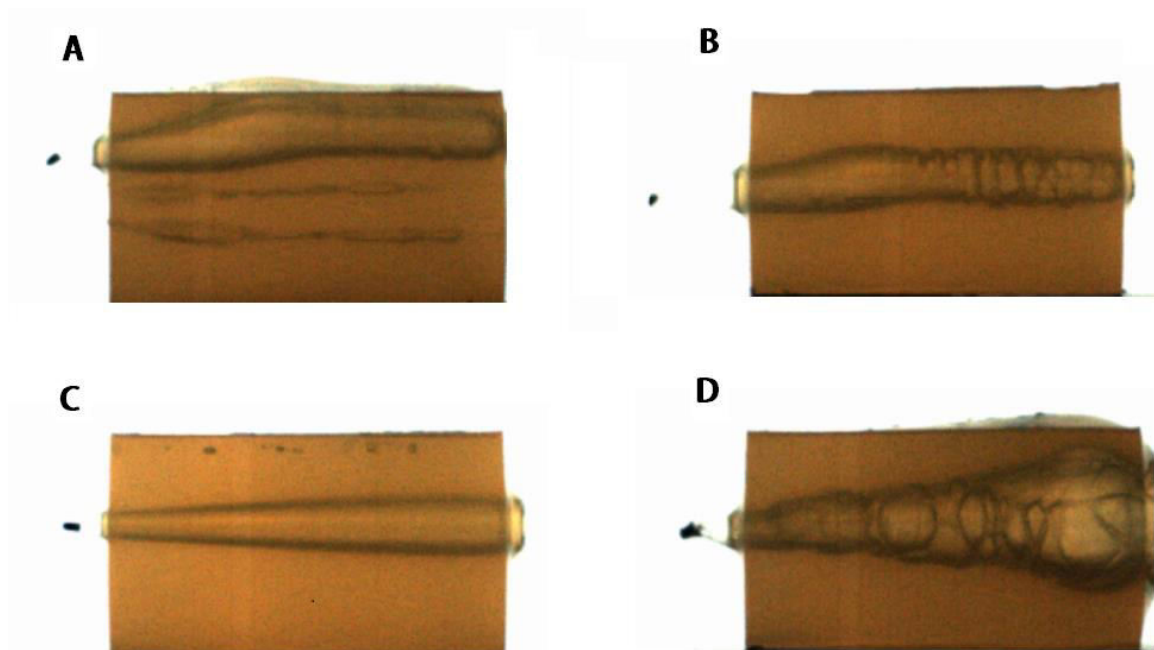
Profil zranění je grafickým popisem účinků střely v balistické želatině, kdy velikost dočasné a trvalé dutiny se dá poměrně přesně změřit z průběhu vytvořených radiálních trhlin na ploše podélného řezu želatinového bloku (obrázek č. 33).



Obr. 33 Radiální trhliny vytvořené střelou LUGER 9 mm FMJ v řezu blokem balistické želatiny [experimentální data]

Vzniklé **radiální trhliny** délkou a hustotou odpovídají okamžitému **množství předané energie** a daném místě střelného kanálu (Klein & Ferko, 2004). Ze známých rozměru (délek) a počtu těchto trhlin v několika příčných řezech blokem a známe celkové předané energii bloku lze stanovit závislost měrné předané energie bloku na dráze střely (Juříček, 2017). Vyhodnocení balistického experimentu touto metodou vyžaduje **rozřezání želatinového bloku** na dostatečně tenké segmenty (2,5 až 5 cm) a následné měření a **sumarizace délek trhlin** na plochách řezu. To činí tuto metodu velmi pracnou a zdlouhavou. Proto lze v praxi přistoupit ke grafickému zobrazení výsledků terminálně - balistického působení malorážové střely v želatinovém bloku (Juříček, 2000).

Takto vytvořené profily zranění poskytují mnoho cenných informací k vzájemnému porovnání účinků zkoumaných střel (obrázek č. 34).



Obr. 34 Profily střelných kanálů (dočasné dutiny) v balistické želatině A) LUGER 9mm FMJ, B) Black Mamba 9 mm, C) Magnum 9 mm FMJ, D) Magnum Gold DOT [experimentální data]

Při tvorbě tohoto profilu autoři sledovali čtyři složky účinku střely na želatinu (zastupující tkáň):

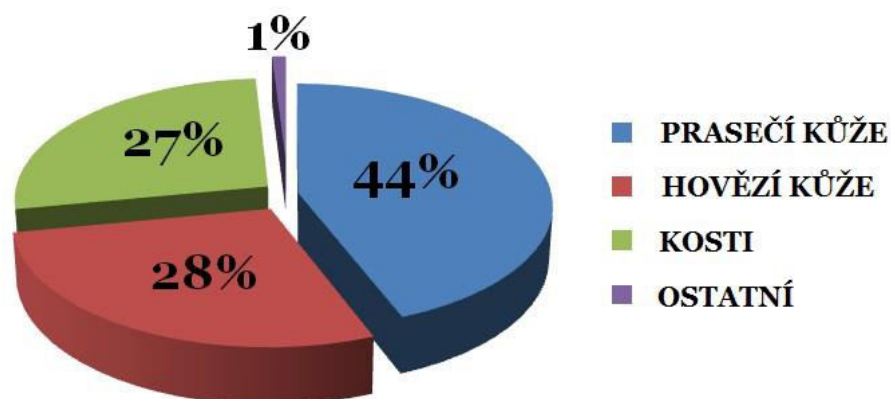
- hloubku vniknutí
- fragmenty střely (dojde-li k jejímu rozpadu)
- velikost dočasné dutiny
- velikost trvalé dutiny

Tuhost, elasticita a průhlednost želatiny umožňuje stanovení její **dynamické odolnosti** k rázu. K tomuto účelu je vhodné použití vysokorychlostní kamery pro snímání změn v želatinovém bloku během proniku střely (obrázek č. 34). U želatiny je nutné použití některé z nepřímých metod pro stanovení závislosti objemu této dutiny na množství předané kinetické energie střely překážce.

9.2.3.1 Složení a vlastnosti

Želatina je kolagen z částečně hydrolyzovaných kůží, pojiv, vazů a kostí zvířat. V současnosti jsou však pro výrobu používány pouze hovězí a vepřové kůže a kosti. Želatina je čistá, lehce stravitelná bílkovina, skládající se z 18 amino-kyselin. Želatina s výjimkou tryptofanu obsahuje veškeré esenciální aminokyseliny.

BALISTICKÁ ŽELATINA



Obr. 35 Obecné složení balistické želatiny [experimentální data]

9.2.3.2 Všeobecné zásady pro přípravu zkušebních želatinových bloků k experimentálnímu postřelování

K zajištění správnosti a reprodukovatelnosti výsledků měření musí být exaktně dodrženy stále podmínky výroby (přípravy) a skladování zkušebních želatinových bloků určených k experimentálnímu postřelování.

V podmínkách ČR se k přípravě želatinových bloků používaných k balistickému postřelování osvědčila cenově dostupná krystalická želatina pro analýzu původně vyráběná firmou LACHMA, a.s.. V současnosti dodávaná firmou ONEX, Vigantice a distribuována do obchodní sítě firem Mercí, s.r.o. Brno.

Želatina je balena v umělohmotných uzavíratelných nádobách po 500g s dobou skladování maximálně 5 let. V zahraničních balistických laboratořích se k ranivé balistice zkoumání osvědčil 10% roztok želatiny (250 bloom typ A firmy Kind @ Knox Company, USA) v blocích o délce 50 cm a příčném průřezu 25x25 cm. Bloky jsou postřelovány po jejich teplotě na teplotu 4 °C (Juříček, 2017).

9.2.3.3 Výchozí materiály pro přípravu želatinových bloků a jejich dávkování

80 hmotnostních dílů vody a 20 hmotnostních dílů krystalické želatiny pro přípravu 20 % roztoku balistické želatiny. Dalšími přísadami, které brání tvorbě plísní, mohou být thymol a kyselina propionová. Fyzikální vlastnosti želatiny jsou silně teplotně závislé, proto pro zajištění homogenního rozložení teploty a fyzikálních a mechanických vlastností želatinového bloku v celém rozsahu je nutná temperace bloků na požadovanou teplotu před střelbou po dobu minimálně 12 hodin. Teploty, které jsou želatinové bloky temperovány, jsou 4 °C (Fackler), 10 °C (NATO) nebo 15 °C (Dynamit Nobel AG) (Juříček, 2017).

9.2.3.4 Vlastní pracovní postup přípravy balistické želatiny (Juříček, 2017).

- Smíchání požadovaného množství (podle připravované koncentrace roztoku) krystalické želatiny (želatinového prášku) se studenou vodou. Pro vytvoření dokonalého roztoku je nutné prášek postupně sypat do vody, nikdy ne obráceně
- Směs želatiny s vodou míchat jen tak málo, jak je to možné, aby nedocházelo k nadměrnému přívodu vzduchu do roztoku (vznik vzduchových bublin s následným porušením homogenity roztoku)
- Uložení (odsátí) směsi do chladicí skříně po dobu cca 2 hod, aby se směsí želatinového roztoku byla vysáta všechna přebytečná voda
- do nádoby s vodou, ne teplejší než 40 °C, umístit nádobu s připravenou směsí a za opatrného míchání dokončit přípravu želatinového roztoku, až do jeho úplného rozpuštění
- plnění formy připraveným želatinovým roztokem. Před tímto krokem je vhodné na vnitřní povrch formy aplikovat transparentní vazelinu ke spolehlivému vyjmutí bloku z formy po jeho ztuhnutí. Uložení takto naplněné formy do chladicího boxu. Proces tuhnutí probíhá při stále teplotě 4-10 °C
- Po vyjmutí želatinového bloku z formy proběhne jeho vizuální kontrola, blok se zabalí do polyethylenové fólie (zabrání se tím vysušení želatiny) a uloží se do chladicí skříně a při teplotě 4°C se ponechá až do jeho použití (min. však 24-36 hod stát)

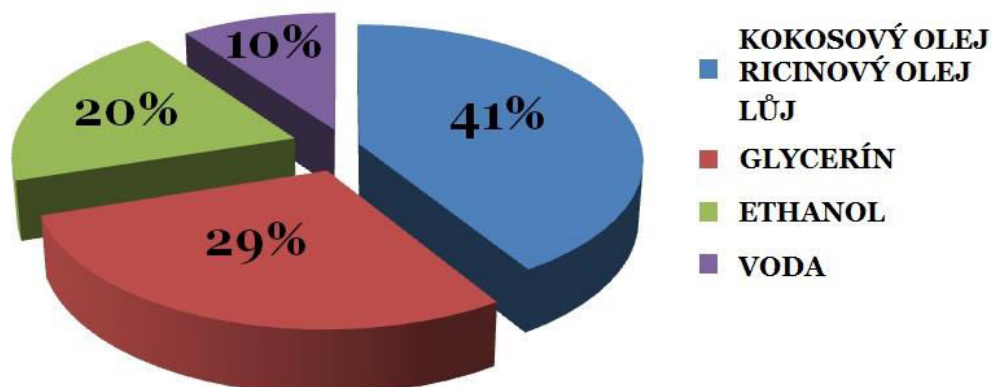
9.2.4 Postřelování glycerínového mýdla

Pro experimenty v ranivé balistice jsou používána výhradně glycerínová mýdla (litá transparentní mýdla), kterých výroba je relativně nákladná.

Konvenční mýdla jsou směsi pevných, ve vodě rozpustných sodných solí různých vyšší mastných kyselin. Jediné mýdlo, které lze použít pro balistické experimenty jsou glycerínová mýdla (tvarované, průhledné mýdla). Vytváření tohoto typu mýdla je poměrně složité, ale smísením mastných tuků a olejů opatrně je možné zachovat konzistenci v průběhu mnoha let, což je důležitým předpokladem pro přesnou verifikaci výsledků (Sellier & Kneubüehl, 2008)

Přeměna mastných kyselin, jejichž obsah v doposud používaných mýdlech se pohybuje mezi 39 a 43 % na mýdlo, je zajištěna varem tuků (kokosový olej, ricinový olej a lůj) v louhu sodném. Další přísady při výrobě mýdla tvoří glycerín, ethanol a voda. Přesné receptury jsou, stejně jako u želatiny, přirozeně svými výrobci přísně střeženy (Sellier & Kneubüehl, 2008).

GLYCERÍNOVÉ MÝDLO



Obr. 36 Obecné složení glycerínového mýdla [experimentální data]

Při postřelování se mýdlo chová téměř úplně plasticky. Vzniklý střelný kanál (obrázek č. 37) se po průchodu střelou blokem pouze nepatrně zúží, je ostře ohraničený a představuje svým objemem přímou tvorbu dočasné dutiny. Z obrázku je patrný jasně ohraničený tvar střelného kanálu (*dočasná dutina*). Nejjednodušší metodou je rozříznutí kanálu po její podélné ose a následné vytvoření fotodokumentace. Vzhledem k tomu, že průřez vytvořeného střelného kanálu je kruhový (vyjímaje výstupního otvoru) je možné provést poměrně přesný výpočet objemu jako funkci jednotlivých vzdáleností (Sellier & Kneubüehl, 2008).

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

Obr. 37 Typy střelných kanálů v mýdlovém bloku (jednotlivé kanály jsou zobrazeny v přibližně stejném měřítku) (Sellier & Kneubüehl, 2001 in Juříček, 2013)

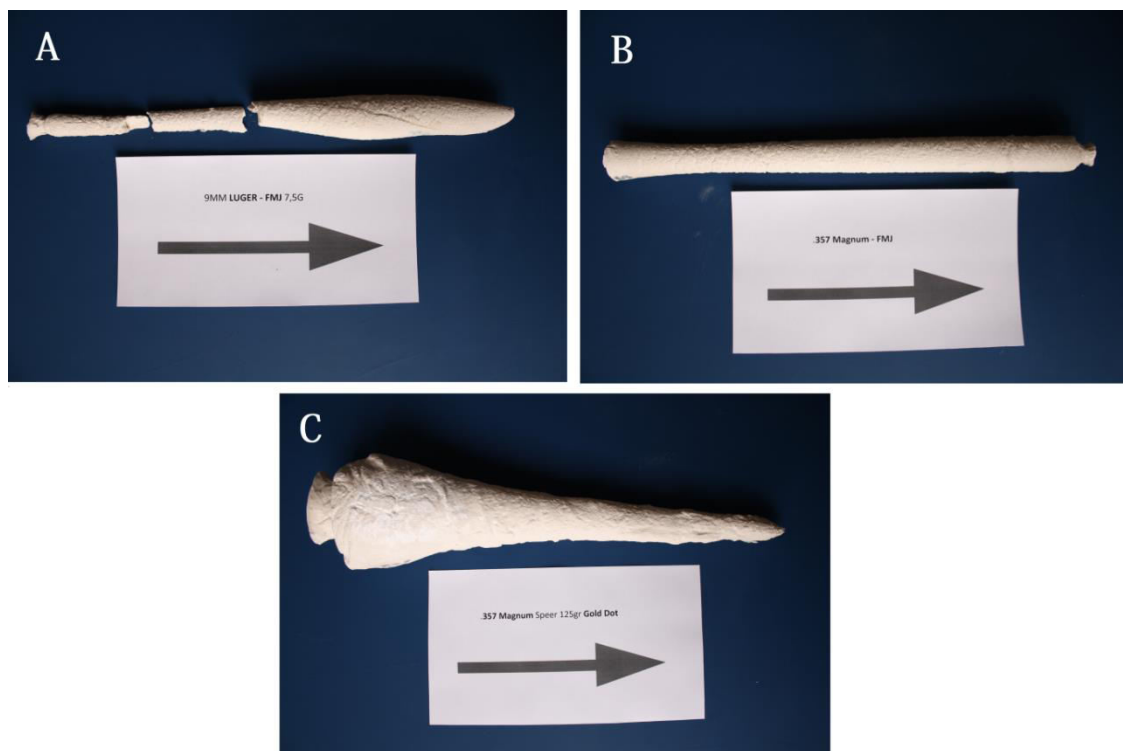
Objem této dutiny kvantitativně představuje množství ovlivněné biologické tkáně, které se dá technicky velmi jednoduše měřit (vylitím dutiny vodou). Pro tuto

vlastnost je mýdlo používané hlavně k měření množství odevzdané energie střely náhradnímu materiálu jako funkce objemu střelného kanálu (Juříček, 2017).



Obr. 38 Na obrázku je patrna nádoba na vodu, normovaná odměrka s tekutinou a balistický blok z glycerínového mýdla se vstupním otvorem [experimentální data]

Plastická tvárnost glycerínového mýdla způsobuje, že po průchodu střely blokem zůstane trvalá dutina ve svém maximálním objemu. Mezi další možnosti získání maximálního objemu patří vytytí dutiny tuhoucím materiálem a následným rozřezáním, získáme sádrové odlitky vyplňující celou kavernu (obrázek č. 38).



Obr. 39 Sádrové vzorky získané vylytím vytvořených střelných kanálů v glycerínovém mýdle a následným rozřezáním balistického bloku A) LUGER 9mm FMJ, B) Magnum 9 mm FMJ, C) Magnum Gold DOT [experimentální data]

Hustota nově vyrobeného mýdla (staré 1 až 3 týdny) činí podle druhu receptury a v závislosti na teplotě 1060 až 1100 kg.m⁻³. Mez pružnosti je velmi malá (0,5 MPa) a ukazuje na výrazně plastické chování mýdla. Rychlost šíření zvuku v mýdle c a jeho dynamická viskozita η jsou velmi silně teplotně závislé. Mýdlo je velmi nízké mezní pružnost (0,5 N / mm²), což je ukazatel jeho plastického chování (Juříček, 2013).

Mezi důležité parametry v souvislosti s pohybem munice jsou rychlost zvuku v médiu a jeho viskozita (Sellier & Kneubüehl, 2008).

M.L.Fackler, který své experimenty prováděl na mýdle, kritérium účinnosti střely jako funkce velikosti dočasné dutiny vyjádřil vztahem:

$$V = \mu \cdot E_{pR} , \quad [\text{cm}^3]$$

kde μ [cm³.J⁻¹] je koeficient vyjadřující objem dočasné dutiny připadající na jednotku kinetické energie střely předané mýdlovému bloku "*faktor proporcionality*". E_{pR} (J) předaná energie. Pro transformaci naměřených údajů z experimentálního postřelování mýdla na očekávané hodnoty objemu dočasné dutiny v biologické tkáni, lze předpokládat asi 4 až 5 krát vyšší hodnoty objemu dočasné dutiny ve svalové tkáni než v mýdle při stejném množství E_{pR} .

Praktické zkušenosti ukazují na to, že střela svou energii v průběhu průniku mýdlovým blokem nepředává rovnoměrně (konstantně) po celé dráze proniku.

Potvrzuje to například uspořádání střelných kanálů od celoplášťové a polopášťové střely v mýdlovém bloku. Ranivý potenciál střely musí být proto chápán jako funkce předání kinetické energie střely na dráze proniku, kterou lze vyjádřit fyzikální závislostí známou pod označením *Martelova teorie* (Juříček, 2017).

Tato funkce předání kinetické energie je pro každý typ střely charakteristická a je zcela analogická funkci odporu prostředí pro daný typ střely. Z toho je zřejmé, že ranivý potenciál střely není možné vyjádřit jednoduchou konstantou, ale funkční závislostí často o několika proměnných. Vytvořený objem dutiny v náhradním materiálu je přímo úměrný vynaložené práci střely.

9.2.5 Porovnání želatiny a glycerínového mýdla jako měřícího prostředku

Dlouhodobá praxe především zahraničních pracovišť potvrdila, že balistická želatina, a glycerínové mýdlo jsou náhradní materiály biologických tkání velmi dobře se hodnotící ke studiu ranivě balistických jevů (Juříček, 2017)

Nicméně, některé vlastnosti obou médií výrazně se liší. To vyvolává otázku, jaký materiál by měl být pro které účely. V další části budeme zkoumat výhody a nevýhody mýdla a želatiny spolu s rozdíly v chování mezi oběma médii. Je nutné se zaměřit při volbě konkrétního média na posouzení jejich pohotovosti k měření, typických rozdílů v jejich dynamickém chování při postřelování a v neposlední řadě i jejich ceny.

- Výroba želatinových bloků je jednoduchá. Želatina ale podléhá působení bakterií (tvorba plísní), proto je její experimentální použití časově omezené. Naproti tomu mýdlo svými vlastnostmi zaručuje dlouhou skladovatelnost (řadu měsíců i let) a neustálou připravenost k použití
- Pohotovost k použití v balistickém experimentu je výrazně na straně mýdla. Je málo citlivé na změny teplot a jeho fyzikální vlastnosti jsou ovlivněny pouze jeho stárnutím
- Pro hodnocení velikosti dočasné dutiny, mýdlo umožňuje přímé měření objemu dutiny střelného kanálu. Hodnocení velikosti dočasné dutiny vytvořené střelou v želatině, je nutné použití nepřímé metody hodnocení z délek trhlin v okolí střelného kanálu, což vyhodnocení výsledků balistického experimentu značně komplikuje
- v obou náhradních materiálech jsou průběhy rychlostí a hloubky vniknutí střely srovnatelné. Postřelováním 10 % **želatiny** temperované na 4 °C je dosaženo největší shody mezi svalovou tkání a simulátorem. Tato výhoda je ovšem vykoupena ostatními přednostmi stojícími na straně **mýdla**, především v jeho okamžité připravenosti k použití

- dynamické chování střely v **želatině** a **mýdle**, v důsledku podobných odporů, se navzájem nijak neliší. Dráhy střel v obou materiálech jsou také podobné. Toto se projevuje rovněž v prakticky stejném průběhu deformace těla střely
- Pro zachycení chování střely uvnitř bloku, je výhodnější použití průhledné želatiny, která umožňuje využití některé z optických metod snímání (vysokofrekvenční kamera). Mýdlo je neprůhledné, a proto je nutné k vyhodnocení výsledků balistického měření použít zobrazovací zařízení, ultrazvuk, což více koresponduje s technikou snímání biologické tkáně

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

Dynamické chování střely je v obou mediích velmi podobné, na obrázku jsou patrná i vizuální charakteristika deformace obou střel po dopadu do náhradního materiálu, je zřejmé, že deformace nabójů je téměř identická.



Obr. 40 *Similarita deformace nábojů v glycerínovém mýdle (vlevo) a v balistické želatině (vpravo). A) Magnum .357 Gold Dot B) Black Mamba 9 mm C) Luger FMJ D) Magnum .357 FMJ [experimentální data]*

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

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

Tab. 4 Hodnocení želatiny a mýdla (Juříček, 2017)

Hledisko použití	Želatina	Mýdlo
Pohotovost k použití	-	+
Měření objemu dutiny	-	+
Zachycení chování střely	+	-
Měření E_{PR} střely	-	+
Cena	+	-

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

10 KRITÉRIA ZASTAVUJÍCÍHO ÚČINKU PISTOLOVÝCH A REVOLVEROVÝCH STŘEL

10.1 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.

10.1.1 Hodnocení efektivnosti

10.1.1.1 Historické pozadí

Od konce 19. století se jsou známy přístupy jak hodnotit účinnost střely pomocí měřících postupů či matematických výpočtů. První pokusy byly provedeny lékaři, kteří sledovali efekt konkrétní munice v živém organismu.

Slavný chirurg a první nositel Nobelovy ceny za medicínu Prof. Theodor KOCHER z Bernské univerzity, předpokládal, že to, co nazýval "živou silou" střely, my dnes označujeme termínem "*kinetická energie*". Tento pojem hrál kruciólní roli při určování účinku munice. V roce 1908, C. G. SPENCER, profesor vojenské chirurgie na Royal Army Medical College, v Londýně, vydal knihu s názvem "*Gunshot Wounds*". V kapitole nazvané "*The Wounding Power of Bullets*", podrobně popsal, jak "*wounding capacity*" úroveň poranění střely závisí na dvou aspektech:

- (kinetické) energii
- Snadnosti střely přeměnit svou energii na práci po zásahu

10.2 Mezinárodně uznávaná kritéria pro měření efektivnosti

K ověřování ranivosti střely existují vedle řady experimentálních metod, které jsou pro svou náročnost na přípravu, vybavení a odbornou úroveň obsluhy pro širší využití prakticky nedostupné, metody využívající k ohodnocení ranivosti střely různé empirické vztahy (Juříček, 2010).

10.2.1 Stopping Power (StP)

Uznávaný americký odborník Generál Julian S.Hatcher představil koncept "**stopping power (StP)**" ve své knize "*Pistols and Revolvers and their use*" již v roce 1927 později kritérium blíže specifikoval a upravil. Jeho hlavní myšlenka předpokládala, že střela vyžaduje jisté množství energie k průniku lidským organismem do dostačující hloubky (udával až 25 cm). Účinnou částí je zde, pouze ta energie, která je přenesena do lidského organismu (Juříček, 2010).

Munice s větším příčným průřezem přenáší tedy více energie, než střela menšího kalibru. *StP kritérium* proto musí být úměrné průřezu střely (*A*). Stejným způsobem autor zahrnoval i tvar špičky střely - pomocí tvarovacího faktoru (*f*). V případě tzv. "kulatého nosu" byla střelám přiřazena menší hodnota než střelám s "tupým nosem", protože přenášeli méně energie.

Vycházíme z definice:

$$\mathbf{StP = E \cdot A \cdot f} \quad \text{"energetická formule"}$$

kde, **E** bylo vyjádřeno v librách, **A** v čtverečných palcích a faktor **f** závisel na tvaru přední stěny náboje (tzv. *form factor*).

Tab. 5 Form faktor pro StP (Stopping Power) a RSP (Relative Stopping Power) (Sellier & Kneubüehl, 2008)

Tvar střely		Zkratka	Form faktor
Full Metal Jacket - Round Nose	Olověná střela s ogivální špičkou	FMJ-RN *	0.9
Lead Round Nose	Speciální střela s plochou špičkou	LRN **	1.0
Wadcutter	Kombinace ogivání a ploché špičky	WC ***	1.1
Semi-Wadcutter	Polo-plášťová střela	SWC	1.25
Semi-Jacketed	Celokovový plášť - ogivání špička střely	SJ	1.25-1.35

* *Střela je krytá vrstvou plastu. Ten má za úkol snížit při střelbě otěr olova v hlavni*

** *Speciální střely určené pro střelbu do papírových terčů, kde vytváří velmi dobře zřetelné průstřely*

*** *Nejčastější použití u revolverových zbraní*

10.2.2 Relative stopping Power (RSP)

Obnovou staršího kritéria se stalo kritérium "**Relative stopping Power (RSP)**", které hodnotí potenciál zneschopnění útočníka a jeho další pokračování v útoku.

Toto kritérium původně vycházelo z kinetické energie střely, ale nyní se určuje výhradně z její hybnosti (zde rychlost vystupuje v první mocnině). Od 70. let je v USA a následně v ostatních vyspělých státech světa přijato **Hatcherovo kritérium (RSP)**, jako základní kritérium účinků pistolového a revolverového střeliva na živou sílu.

Vypočítá se podle empirického vztahu:

$$RSP = k \cdot m_q \cdot v_o \cdot S \quad [\text{kgm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

kde, m_q je hmotnost střely (kg), v_o počáteční rychlost střely (ms^{-1}), S plocha jejího příčného průřezu (m^2) a k je multiplikační konstanta ($k = k_1 \cdot k_2$): k_1 - převodní součinitel do soustavy SI ($1,79 \cdot 10^5$), k_2 - empiricky stanovený součinitel, závislý na konstrukci střely, materiálu a tvaru její hlavové části a je volený v rozmezí 0,9 až 1,35 (*form factor*).

Původní návrh kritéria účinnosti střely RSP vycházel z anglosaských měrových jednotek. Do vztahu pro výpočet RSP byly dosazovány tyto veličiny: hmotnost střely m_q v grainech ($1\text{ gr} = 0,064799\text{ g}$), počáteční rychlost střely v_0 ve stopách za sekundu ($1\text{ fps} = 0,3048\text{ ms}^{-1}$), plocha příčného průřezu střely ve čtverečných palcích ($1\text{ inch} = 25,4\text{ mm}$).

Porážející (zastavující) účinek střely roste s rostoucí hodnotou kritéria RSP, která se zvětšuje s růstem hmotnosti, počáteční rychlosti a příčného průřezu střely. U pistolového a revolverového střeliva je požadovaná velikost RSP dosahována úrovní počáteční rychlosti, hmotnosti a ráže střely. Z jejich vzájemného vztahu vyplývá, že pro velikost zastavujícího účinku pistolové (revolverové) střely má dominantní význam velikost její ráže (Juříček, 2010).

10.2.3 Relative Energy Transmission (RET)

V posledních letech se od hodnocení kritériem RSP upouští a zavádí se kritérium RET "**Relative Energy Transmission (RET)**", které v sobě zahrnuje vliv průbojného, tříštivého, trhavého a nepřímo i zastavujícího účinku hodnocené střely.

Hodnota RET je tím větší, čím je delší dráha střely v překážce, čím větší je objem trvalé dutiny a čím větší část dopadové energie střely se spotřebuje v zasaženém cíli. Hodnota *kritéria RET* obecně roste především se zvyšující se dopadovou rychlostí střely a pozitivní vliv má rovněž ráže střely a její deformační schopnost.

Relativně nejvyšších hodnot RET za těchto podmínek (ale i při hodnocení RSP) dosahují deformující se pistolové a revolverové střely, tedy střely, poloplášťové SP (Soft point) a zejména střely s dutinou ve špičce, tedy expanzivní HP (*Hollow point*), které se nyní vyrábějí i v různých modifikacích. Dobrých výsledků je také dosahováno s olovenými střelami válcového tvaru (*Wadcutter*) a tvary z nich odvozenými (*Semiwadcutter*). Olovené střely (*Lead*) mají z hlediska RET obecně lepší výsledky než střely celoplášťové (*Metal jacketed*) (Juříček, 2010).

Přesto ani toto kritérium není schopno s určitostí říci, zda hodnocená střela vyřadí již první ranou útočníka z jakékoliv další, byť podvědomé činnosti. Existuje však jeden poměrně objektivní způsob, jak toto zjistit – *více v kapitole "One Shot Stop (OSS)"*

10.2.4 WEIGEL kritérium k hodnocení efektivity (W_H)

Známý německý balistik, vypočítával efektivity střely, podle velikosti střelného kanálu ve dřevě. V roce 1975 jako první z balistiků využil alternativního simulantu ke studiu interakce mezi střelou a cílem. Pro své kritérium využil hloubku průniku. Vynásobením hloubky průniku příčným průřezem střely, získal teoretický objem střelného kanálu a tím byl schopen vypočítávat efektivity konkrétních nábojů.

$$W_H = 0.00024 \cdot m \cdot v \quad [\text{kg} \cdot (\text{m/s})]$$

Přestože objem střelného kanálu ve dřevě je často podstatně menší než objem dočasné dutiny a vzhledem k tomu, že hloubka průniku je odlišná, toto kritérium nedokáže validně hodnotit efektivitu jednotlivých střel.

10.2.5 SELLIER kritérium k hodnocení efektivnosti (W_{TH})

Princip kritéria udává, že efektivnost je úměrná energii, kterou je schopna střela přenést do tkáně, tj. potenciální poškození. Tato energie je úměrná objemu dočasné dutiny, a tudíž také souvisí s objemem dočasné dutiny. Množství poškozené tkáně, závisí na mechanických a morfologických vlastnostech jednotlivých tkání. Pokud hodnotíme dva stejné náboje se stejnou kinetickou energií a stejným konstrukčním typem, ale rozdílů velikostí hustotou průřezu (SD). Střela s menší hodnotou SD bude mít větší koeficient zpomalení, bude tedy přenášet více energie a tím vytvoří větší tzv. "dočasnou dutinu". Tato střela bude považována za efektivnější.

$$SD = \frac{\text{(hmotnost střely grain)}}{7000 \times \text{průměr kulky v palcích} \times \text{průměr střely v palcích}}$$

Z toho důvodu společnost Sellier vyvinula jednoduché kritérium *efektivnosti* W_{TH} . Vezmeme-li v úvahu velikost střelného kanálu - dokážeme vypočítat jednotlivé dopadové energie střely, které jsou nepřímo úměrné hustotě průřezu (Juříček, 2017).

$$W_{TH} \propto \frac{E_a}{SD}$$

Níže udávaná *tabulka č. 6* z knihy Sellier & Kneubüehl (2011), znázorňuje hodnocení výše zmiňovaných kritérií pro konkrétní munici. Zvýrazněné munice, byly zastoupeny i v našem experimentu – viz *kapitola 14*.

Tab. 6 Srovnání účinnosti vybraných střel a jejich hodnocení dle stanovených mezinárodních kritérií (W_H , W_{TH} , StP , RSP) (Sellier & Kneubüehl, 2011)

ZBRAŇOVÝ SYSTÉM	m [g]	V [m/s]	E [J]	A [mm ²]	l [cm]	W_H	W_{TH}	StP	RSP
22 short	1.85	285	75	24.6	8.2	2.0	2.0	1.9	2.4
22 L.R.	2.55	330	142	24.6	14.4	3.6	2.7	3.5	3.3
6.35 Browsing	3.25	230	88	21.7	8.4	2.7	1.7	2.8	4.2
7.63 Mauser	5.5	440	535	46.0	25.4	11.7	8.9	25	20
9 mm Luger *	8.0	350	490	63.6	17.2	11.0	7.8	31	32
38 Spl	10.2	265	330	63.6	14.5	9.3	4.5	24	35
.357 Magnum *	10.2	450	1010	36.6	14.5	9.3	4.5	24	35
44 Rem. Mag. *	16.0	475	1800	98.5	41.7	41.3	22.3	182	135
45 Auto	14.0	260	516	99.4	14.9	14.8	6.7	15	59

Legenda: m - hmotnost střely, v - rychlost střely, E - předaná kinetická energie, A - příčný průřez, l - délka projektilu, W_H - WEIGEL kritérium, W_{TH} - SELLIER kritérium, StP - Stopping Power, RSP - Relative Stopping Power

* náboje užití v našem experimentu

10.2.6 Relative Incapacity Index (RII)

V roce 1983 vydal Americký národní institut spravedlnosti rozsáhlou studii (Bruchey & Frank 1983a; 1983b) navrhující "**relative incapacity index (RII)**" relativní nekapacitní ukazatel. Toto kritérium kromě celkové předané kinetické energie střely tkáním v sobě rovněž zahrnuje tvar (velikost) a polohu dočasné dutiny vzhledem k umístění vitálních orgánů a tkání zasažené živé síly. Hodnocení účinnosti střel pomocí "relative incapacity index" vyžadovalo široké použití experimentu a náročného početního zpracování naměřených údajů. Proto byly podniknuty nové kroky k jednoduššímu hodnocení účinnosti střeliva pro osobní palné zbraně (Juříček, 2010).

10.2.7 Power Index Rating (PIR)

Další americký autor Matunas v roce 1984 zveřejnil účinný vzorec pro výpočet efektivnosti střely, který nazval “**Power Index Rating (PIR)**”.

$$\text{PIR} = \frac{v_d^2 \cdot \text{ET} \cdot m_q}{12111} \cdot D$$

kde v_d - dopadová rychlost střely [fps]
 ET - součinitel využití kinetické energie střely v cíli
 m_q - hmotnost střely [gr]
 D - velikost ráže střely reprezentovaná číslem ráže

Při bližším pohledu na vztah je zřejmé, že PIR hodnota v sobě zahrnuje dopadovou kinetickou energii střely, tvořící ústřední veličinu tohoto vztahu. **Číslem 12 111** ve jmenovateli stanovil autor hodnotu PIR na úroveň 100, odpovídající dostatečnému účinku střely na živou sílu. Na této bázi *E.A. Matunas* postavil hodnotící stupnici, která je uspořádána do *tabulky č. 7*

Tab. 7 Hodnota přenosu energie (ET) pro PIR podle E.A. Matunase (Sellier & Kneubüehl, 2011)

Hodnoty součinitele ET	Popis
0.01	střely deformující se
0.0085	tvarově stabilní střely, jejichž čelní plocha tvoří minimálně 60 % jejich příčného průřezu
0.0075	všechny ostatní tvarově stabilní střely

Tab. 8 Číslo ráže (D) běžně používaných rozsahů ráží pro PIR (Sellier & Kneubüehl, 2011)

D	Rozsah ráží	
	[mm]	[palce]
0.80	5.05 - 6.33	200 - 249
0.85	6.34 - 7.60	250 - 299
0.90	7.61 - 8.87	300 - 349
1.00	8.88 - 10.14	350 - 399
1.10	10.15 - 11.41	400 - 449
1.15	11.42 - 12.69	450 - 499

Tab. 9 Hodnotící tabulka účinnosti střel podle PIR (Sellier & Kneubüehl, 2011)

PIR	Účinek na živou sílu
< 24	nezpůsobilý
25 - 54	pouze při určité poloze zásahu
55 - 94	částečně způsobilý, v praxi ovšem často nedostatečný
95 - 150	ideální
151 - 200	velmi účinný
> 200	silný

10.2.8 Knockout Value „KO“ kritérium

Autorem tohoto kritéria je J.Taylor, který jej v roce 1948 navrhl pro posuzování účinnosti loveckého střeliva. Ve vztahu pro výpočet *KO kritéria* vystupuje místo plochy příčného průřezu střely (**S**), pouze její průměr (**d**). Rovněž do tohoto vztahu nevstupují žádná další specifika, jako deformace, což naznačuje, že by mohlo být užito pouze pevné, celoplášťové střely. Proto je KO kritérium, na rozdíl od jiných (StP nebo RSP podle Hatchera), přijímáno velmi s nadsázkou.

$$KO = m_q \cdot v_d \cdot d$$

kde **m_q** a **d** (hmotnost a ráže střely) jsou základní konstrukční charakteristiky a **v_d** (dopadová rychlost střely) je základní balistickou hodnotou posuzované střely.

10.2.9 One Shot Stop (OSS)

Přední američtí bališičtí odborníci *Evan Marshall a Edwin Sandow* provedli výzkum založený na rozsáhlé analýze ozbrojených střetnutí, ke kterým došlo v USA za posledních dvacet let. Zkoumali přitom, kdy a s jakým střelivem došlo k požadovanému účinku střely, tedy k **úplnému vyřazení útočnicka** jediným zásahem. Bylo analyzováno mnoho tisíc případů, kdy proti útočnickům zpravidla stáli policisté. Touto skutečností bylo do jisté míry ovlivněno statistické zastoupení jednotlivých ráží.

Marshall a Sandow z celkového počtu případů s daným typem náboje a střely vybrali pouze zásahy do trupu a zjišťovali podíl případů, kdy útočník **po jediném zásahu nebyl schopen žádné útočné akce** a maximálně ušel po zásahu vzdálenost do 10 stop (3 m). Toto procento z celkového počtu případů s daným typem střeliva nazvali **One Shot Stop (OSS)**.

Optimálního výsledku by bylo dosaženo při OSS = 100 %. To by znamenalo, že při každém zásahu do trupu by došlo k vyřazení útočnicka z akce. Takové vlastnosti sice žádný typ pistolových a revolverových nábojů neprokázal, ale některé z nich se k této hodnotě značně přiblížily (Juříček, 2010).

Nejúčinnější typy pistolových a revolverových nábojů proti živé síle autoři seřadili sestupně podle dosaženého kritéria OSS. Z provedeného výčtu používaných nábojů zůstávají tři opravdu účinné ráže. Jasně vedoucí .357 Magnum společně s .40 S & W a za nimi .45 ACP.

Lze očekávat, že i při hodnocení střel klasické konstrukce by se mezi nejučinnější ráže zařadily zejména .44 Magnum, .41 Magnum

Tab. 10 Hodnoty „OSS“ vybraného pistolového a revolverového střeliv (podle Marshalla & Sandowa) in Juříček, 2000

Ráže střely	Druh náboje	m_q	v_o	N	OSS
		[g]	[$m \cdot s^{-1}$]		
.357 Magnum *	Federal JHP	8,1	442	523	96
.40 S & W	Cor-Bon JHP	8,7	396	24	96
.45 ACP	Federal H-S	14,9	260	71	94
9mm Luger *	Cor-Bon JHP+P	7,5	412	32	91
.44 Magnum *	Winchester ST	13,6	380	50	90
.44 Special	Winchester ST	13,0	247	60	75
.22 LR	CCI Stinger	2,1	420	395	34
6,35 Browning	Winchester JHP	2,9	250	119	25

Legenda: Zredukovaný počet střel ($N = 16$); ukázka používaných nábojů

- N* počet případů, v nichž byl tento náboj použit a zaveden do hodnocení
JHP plášťová expanzivní střela
ST Silver-Tip
+P náboje se zvýšeným tlakem plynů

Hodnotící stupně účinnosti: malá účinnost do 60 %, střední 60-80 %, vysoká 80-90 % a velmi vysoká nad 90 %.

* náboje užití v našem experimentu

10.2.10 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 dosazeny 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 materiálu (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).

10.3 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.

10.3.1 Ranivý potenciál - Wounding potential (WP)

Potenciál střely (**WP**) je inspirován dostupnými literárními zdroji (Juříček, 2017, Kneubüehl, 2011) a vzhledem k definici dodatečných parametrů v kontextu této studie je definován jako smluvní energetická hustota střely:

$$\mathbf{WP} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{v}^2}{\frac{\pi \mathbf{d}^2}{4}}$$

WP – ranivý potenciál, *v* – úst'ová rychlost, *d* – průměr projektilu, *m* – hmotnost projektilu

10.3.2 Ranivý účinek – Wounding Effect (WE₁)

Parametr **WE₁** poukazuje na kvantifikaci aktuálního účinku střely na základě dat zaznamenaných v želatinových blocích, tj. změny kinematického pohybu střely v bloku. Lze jej vyhodnotit jako smluvní hodnotu deformační energie je vztaženou k vytvořenému objemu bloku balistické želatiny. Tato definice předpokládá, že ztráta kinetické energie výstřelu je kompletně spotřebována k transformaci bloku želatiny v průběhu pronikání projektilu:

$$\mathbf{WE}_1 = \frac{\mathbf{E}_{kin} - \mathbf{E}_{kex}}{\mathbf{V}_{BG} \cdot 1000}$$

WE₁ – ranivý účinek, *E_{kin}* – vstupní kinetická energie, *E_{kex}* – výstupní kinetická energie, *V_{BG}* – Celkový objem dutiny v glycerinovém mýdle

K parametru **WE₁** je zaveden ekvivalent založený na výsledcích při testování mýdlových bloků, tj. *geometrie trvalé dutiny*. Parametr **WE₂** je tedy definován jako geometrická charakteristika při poměru dosaženého objemu trvalé dutiny a celkového objemu balistického bloku glycerinového mýdla.

$$WE_2 = \frac{V_{cav}}{V_{GS} \cdot 1000}$$

WE_2 – ranivý účinek, V_{cav} – Objem trvalé dutiny, V_{GS} – Objem balistického bloku před impaktem

Užitím rychlosti projektilu můžeme jednoduše zavést do definice související výše uvedený parametr WE_1 , kterým budeme PA_1 stanovovat pomocí:

$$PA_1 = \frac{E_{ex}}{E_{in}} = \frac{v_{ex}}{v_{in}}$$

PA_1 – Penetrační schopnost - poměr vstupní a výstupní rychlosti, E_{ex} – výstupní energie
 E_{in} – vstupní energie, v_{ex} – rychlost výstupu, v_{in} – rychlost vstupu

Parametr **PA** kvantifikuje schopnost projektilu penetrovat náhradní materiál. Kritérium vychází z předpokladu, že střela, která se snadno pohybuje přes daný materiál, ztrácí méně kinetické energie než střela, která způsobuje značnou deformaci materiálu, za předpokladu, že projektily nemění svou hmotnost. Proto je tato vlastnost ve výsledku kvantifikována poměrem jednoduché vstupní a výstupní rychlosti na vstupní a výstupní ploše balistického bloku.

Podobně jako v předchozích případech (WE_1 vs. WE_2), i výše uvedený parametr PA_1 , existuje ekvivalentní - parametr PA_2 - jehož definice je založena primárně na **parametrizaci trvalé dutiny**. Definice parametru PA_2 je založena na předpokladu, že střela vytváří objemný střelný kanál nebo že střelný kanál má značně odlišné průměry podél své délky, což je způsobeno vysoce expanzivním účinkem konkrétní střely. To znamená, že tento náboj penetruje v materiálu mnohem obtížněji a způsobuje objemově významné tvarové změny.

$$PA_2 = \frac{\frac{D_{in}}{d} + \frac{D_{out}}{d} + \frac{D_{max}}{d}}{SD\left(\frac{D_{in}}{d}; \frac{D_{out}}{d}; \frac{D_{max}}{d}\right)}$$

PA_2 – penetrační schopnost; D_{in} – průměr vstupní střelného kanálu; D_{out} - průměr výstupní střelného kanálu; D_{max} – max. průměr ve střelném kanálu; d – průměr projektilu SD – směrodatná odchylka pro množinu průměru

Čitatel ve zlomku představuje součet expanzivních účinku střely v průběhu penetrace v bloku glycerínového mýdla. Jmenovatel zlomku představuje odpovídající směrodatnou odchylku souboru hodnot uvedených v čitateli. Tímto způsobem se hodnotí, jak celkový expanzivní efekt střely, tak rozměrová stabilita trvalé dutiny.

10.3.3 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 efektivity 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.

11 BALISTICKÉ OCHRANNÉ POMŮCKY

Balistická ochrana je vybavení, které chrání člověka proti účinkům střelných zbraní. Balistické ochranné vesty jsou jedním z nezákladnějších 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)

11.1 Historie

Snaha o ochranu člověka v boji je stará téměř jako lidstvo samo. První profesionální bojovníci se brzy ve střetnutích snažili zabránit účinkům bojových nástrojů protivníka, napřed velmi primitivním a improvizovaným způsobem, později již cílenou výstrojí. V 15. – 18. století se stále širším zaváděním palných zbraní, které poměrně snadno překonávaly veškerá dosavadní „brnění“, tradiční ochrana jednotlivce čím dál víc ztrácela svůj význam.

První měkká neprůstřelná vesta byla vynalezena ve firmě Joseon v Koreji. V roce 1860 byly tyto vesty vyrobeny ze 13-ti záhybů bavlny, ačkoliv byly vesty v té době účinné proti kulkám, byly snadno hořlavé a v létě příliš teplé na nošení (Knotková, 2014). Až v průběhu první světové války po neúnosných ztrátách, jež byly především důsledkem zranění hlavy, začaly být znovu široce zaváděny ocelové přilby a s nimi občas i tělové pancíře. To byl čas „znovuzrození“ bojových ochranných prostředků novověku (Černý, 2008).

V roce 1969 byla vyrobena „americká neprůstřelná vesta“, která byla vyráběna z patentované kombinace prošivaného nylonu s několika ocelovými deskami. Ta byla na trh uvedena pod obchodním názvem Barrier Vest. V polovině roku 1970 DuPont vyvinul vysoce účinné kapalně krystalické vlákna Kevlar, což je ochranná známka pro lehké, silné para-aramidové syntetické vlákno. Od roku 1970 bylo vyvinuto několik nových vláken a konstrukčních metod pro neprůstřelné látky, kromě Kevlaru i Dyneema od DSM, Gold Flex a Spectra od Honeywell, Twaron od Teijin Twaron a Zylon od Toyobo (Knotková, 2014).

Tyto novější materiály jsou lehčí, tenčí a odolnější než Kevlar, ale mnohem dražší. Dva hlavní typy polymerních vláken běžně používané v komerčních balistických vestách v současné době jsou para-aramid a polyethylenová vlákna o ultra vysoké molekulové hmotnosti.

11.2 Vlastnosti a princip balistických ochranných pomůcek

Funkce neprůstřelné vesty spočívá na principu zmaření dopadové energie střely tím, že střela zachytí jednotlivá vlákna balistického panelu. V případě rychlosti střely menší než 2000 m/s, neprůstřelné vesty obsahují vrstvy velmi silných vláken k zachycení a deformování kulky, ta deformuje materiál do tvaru misky a šíří svoji energii přes větší část tkaniny vesty (Knotková, 2014).

Střela je na sebe namotává a snaží se je přetřhnout nebo odsunout stranou ze své dráhy. Při tom dochází ke snaze posunout vlákna v pevně tkané látce balistického panelu a značná část energie se vybijí třením uvnitř látky. Vlákna balistického panelu jsou pevná a i jejich přetržení spotřebuje značné množství energie. Když je balistický materiál zasažen kulkou, vlákna budou namáhána zejména ve směru osy vláken a díky obrovské pevnosti vláken v tahu, je schopen projektil zastavit (Sparks, 2012).

Účinnost průbojných střel vůči neprůstřelným vestám je dána takovou **konstrukcí střely**, která dovoluje jen minimální deformace střely, zachytí tedy málo vláken a namísto jejich trhání a napínání je pouze odsune stranou. Dále se zjistilo, že rozhodující pro balistickou odolnost je způsob tkaní a jeho orientace při skládání jednotlivých vrstev na sebe.

Také odolnost proti vlhkosti a nasákavost celé soustavy je důležitým faktorem, stejně jako její hmotnost (Ptáček, 2007). Vesta má hmotnost typicky 5-6 kg. Vesta nabízí nízký komfort a to z důvodu, že je těžká a tuhá. V současné době je para-aramidový materiál, který je použit v neprůstřelných vestách, zabalen ve vodotěsné fólii, která je jedním z důvodů, proč ochranná vesta přináší velmi špatný komfort, jelikož jsou vesty nepropustné pro vzduch (Mahltig, 2008).

Asi 30 vrstev para-aramidových tkanin (*hmotnost tkaniny 200 g.m⁻²*) je schopno zastavit projektil z většiny běžných ručních zbraní (Mahltig, 2008; Sparks, 2012).

Měkká ochrana se dále vybavuje antišokovými vložkami, které jsou vrstvou nejbližší k tělu a jejich funkcí je absorbovat energii střely tak že jí rozloží na větší plochu těla a tím zmenšit průhyb vesty v místě dopadu střely. Existují systémy klasifikace vest podle odolnosti, které dnes používá prakticky celý svět a které dávají dobré vodítko při posuzování vhodnosti vesty pro ten který úkol.

11.3 Konstrukce balistické vesty

Základním prvkem je balistický nosič. Vlastní nosič nemá sám o sobě žádnou balistickou odolnost a slouží k připevnění balistických a jiných ochranných prvků a jejich udržení na správném místě. Při výrobě jsou použity nejrůznější druhy materiálů, od bavlny po speciální materiály dotýkající se těla s vlastnostmi pro lepší odvádění vody (potu) nebo poskytující vysokou odolnost proti opotřebení z každodenního užívání (Liška, 2016).

Nezákladnějším typem je samotný nosič obsahující pláty vzadu a vpředu a ochraňující pouze trup. V případě nepřilíš vysokých požadavků na třídu odolnosti se

taková vesta obvykle nosí pod košilí nebo uniformou, je to takzvaná podkošilová nebo skrytě nošená. Je tvořena vložkami z měkké balistiky, po případě se může doplnit o tvrdé pláty, které zvýší její odolnost. Průměrná komerčně vyráběná vesta v balistické odolnosti III-A podle NIJ začíná na hmotnosti kolem 1,5 kg.



Obr. 41 Neprůstřelná vesta pro skrytě nošení Fenix Guard (Tarasov, 2017)

Opačným případem je kompletně vystrojená vojenská balistická vesta, která se může skládat z libovolných kombinací, jako jsou měkké balistické vložky, přední, zadní a boční tvrdé pláty, límec na ochranu krku, ochrana ramen, opasek s přídatným chráničem slabin a spodní částí zad, systém rychlého odhozu, *MOLLE* vazba pro vybavení a doplňky, protiskluzná a protitlaková opěrka na pažbu zbraně atd. Všechny ochranné prostředky jsou opatřeny balistickými vložkami (Liška, 2016).

Moderní vojenské vesty začínají na hmotnosti kolem 6 až 8 kg, a to vybavené měkkou balistickou vložkou s ochranou ramen, slabin a krku odolávající střepinám, bodným zbraním a střelám například 9 mm Luger nebo 7.62x25 Tokarev bez vložených ochranných plátů (Tarasov, 2017)

11.4 Třídy balistické odolnosti

Balistické neprůstřelné vesty jsou vyráběny a dodávány v třídách odolnosti podle norem **USA NIJ STANDARD** – 0101.06 (IIA, II, IIIA, III, IV) dosahující maximální TBO III (třídy balistické ochrany). V ČR - **ČSN 39 5360** v třídách 1-7. Americká norma je součástí standardu a testování v programu *National Institute of Standards and Technology* (NIST) a *National Institute of Justice* (NIJ). Česká norma je časově mladší normou pro zařazení a testování nejen balistických ochranných pomůcek ale i nejtvrděší mezinárodní normou z hlediska splnitelnosti požadovaných parametrů. Další často využívanou zahraniční normou je **STANAG 2920**.

Vesty v základním provedení chrání před účinky projektilů s měkkým jádrem krátkých střelných zbraní s ústřelovou rychlostí nepřevyšující rychlost 500 m/s. Pro

zvýšení efektu při bezpečnosti a ochraně osob a zdraví při práci, je vhodné současné vybavení i speciálním oděvem snižujícím riziko šoku způsobeného dopadem projektilu při zásahu vesty. Jsou to speciálně vyvinutá tzv. *protišoková trička nebo vložky*, jež citelně omezují tyto účinky.

Podle standardních norem americké *klasifikace NIJ* je **dovolen maximální průhyb vesty** po zásahu 40 mm. Podle *standartu ČSN* je dovolena **maximální hodnota trauma** ve výši 25 mm a to bez rozlišení zda se jedná o vestu skrytě nebo neskrytě nošenou. Dalším parametrem, který je požadován, je **maximální objem vzniklého vtisku** a to 8 ml. Tomuto objemu přísluší maximální hloubka traumatu do 2 mm (Ptáček, 2007).

Tab. 11 *Třídy balistické odolnosti podle americké normy NIJ Standard – 0101.06*

TŘÍDA	RÁŽE	TYP STŘELY	HMOTNOST [g]	RYCHLOST STŘELY [m/s]
Typ II A	9 mm	FMJ RN	8.0	373 ± 9.1
	.40 S&W	FMJ	11.7	352 ± 9.1
Typ II	9 mm Luger	FMJ RN	8.0	398 ± 9.1
	.357 Magnum	JSP	10.2	436 ± 9.1 m/s
Typ III A	.357 SIG	FMJ FN	8.1	448 ± 9.1
	.44 Magnum	SJHP	15.6	436 ± 9.1
Typ III (Rifles)	7.62 mm	FMJ	9.6	847 ± 9.1
Typ IV (Armor Piercing Rifle)	.30 caliber	AP	10.8	878 ± 9.1

Legenda: *FMJ RN* - Full Metal Jacketed Round Nose; *FMJ* - Full Metal Jacketed; *JSP* - Jacketed Soft Point; *FMJ FN* - Full Metal Jacketed Flat Nose; *SJHP* - Semi Jacketed Hollow Point; *AP* - armor piercing

Tab. 12 Třídy balistické odolnosti podle české normy ČSN 39 5360

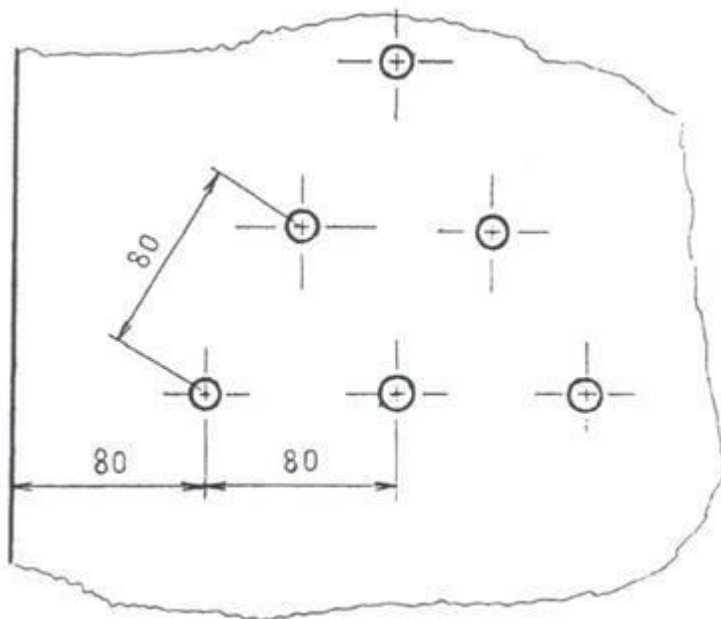
ÚROVEŇ	RÁŽE	TYP STŘELY	HMOTNOST [g]	RYCHLOST STŘELY [m/s]
1	.22	Pb / O	2.6	300 ± 10
2	9 mm Luger	CP /Pbj / O	8	410 ± 10
2 cz	7.62 x 25	CP /Pbj / O	5.5	470± 10
3	.357 Magnum	CP / Pbj	10.2	430 ± 10
3 cz	9 mm Luger	CP /Fej / O	6.45	440± 10
4	.44 Magnum	CP / Pbj	15.6	440± 10
4 cz	7.62 x 25	CP /Fej / O	5.5	550 ± 10
5	.223 Rem.	CP /Pbj	4	920 ± 10
5 cz	7.62 x 39	CP /Fej	8	710 ± 10
6	7.62 x 51	CP /Pbj	9.5	830± 10
6 cz	.223 Rem.	CP /Fej	3.95	950± 10
7	7.62 x 51	CP /Fej	9.8	820 ± 10
7 cz	7. 62 x 54 R	CP /Fej	9.75	860 ± 10

Legenda: CP (FMJ) - Celoplášťová střela; Fej - Kovové jádro; Pbj - Olovené jádro; O - Ogivál

11.5 Testování balistických vest dle platností norem (NIJ, ČSN)

11.5.1 Zkouška dle ČSN 39 5360

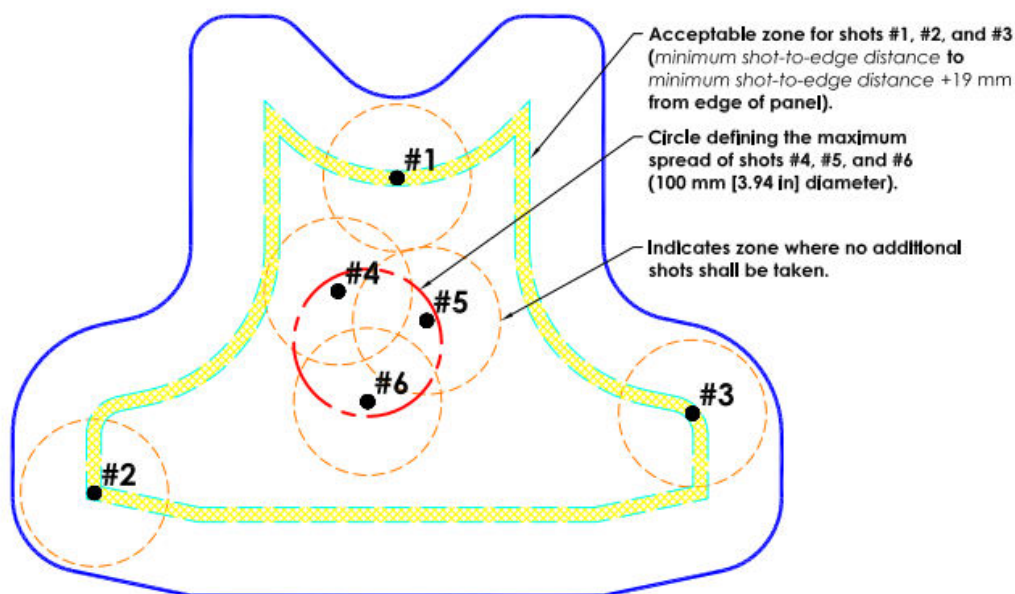
Vzorky se zkoušejí v dané TBO (*třída balistické odolnosti*) minimálně třemi výstřely pro každou ráži a to tak, aby střela dopadla kolmo na zkoušený vzorek a **minimální vzdálenost zásahu** od kraje zkoušeného vzorku a mezi jednotlivými zásahy nesmí být více než 80 mm. V případě, že velikost poškození vzorku při zásahu má průměr větší než 80 mm, musí okolní vzdálenosti být ve vzdálenosti minimálně rovny průměru předešlého poškození. Jeli poškození příliš velké, musí se použít více zkušebních vzorků. Po každém výstřelu se zaznamenává účinek střely v ochranném prostředí a hloubka vtisku v podkladovém materiálu. V případě, že bude rychlost střely jiná, než je uvedeno v *tabulkách č. 11 a 12*, musí se pokus opakovat.



Obr. 42 Rozmístění zásahu podle normy ČSN 39 5360

11.5.2 Zkouška dle NIJ 0101.06

Pro správné provedení testu a jeho opakovatelnost stanovuje norma také správné rozestavení jednotlivých prvků testovací aparatury. Hlavními prvky jsou testovací zbraň, chronograf, testovaná zbroj a podkladový materiál (Krupica, 2009). Norma NIJ 0101.60 také stanovuje požadavky na rozmístění zásahů na ploše testované zbroje. Jak uvádí *obrázek č. 43*, zásahy 1, 2 a 3 jsou umístěny 50 mm od okraje testované zbroje. Zásahy 4, 5 a 6 jsou umístěny ke středu testované zbroje tak, že tvoří kruh o průměru 100 mm.



Obr. 43 Rozmístění zásahů podle normy NIJ 0101.06

11.6 Materiálové řešení balistické ochrany proti projektilům

Základními prvky balistické ochrany proti působení projektilů a střepin jsou pancíře, které lze klasifikovat podle celé řady hledisek (*kritérií*). Podle vnitřní konstrukce mohou být pancíře rozděleny především na **homogenní** a **heterogenní** (*nehomogenní*).

V této práci se budeme zabývat pouze heterogenními pancíři, které jsou dále rozděleny na *vrstevné* (složené pancíře), které jsou tvořeny materiálovými vrstvami s různými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, skládanými sériově za sebou. Dále *kompozitními* pancíři, které jsou tvořeny dvěma vzájemně integrovanými fázemi, umístěnými paralelně.

K **nekovým heterogenním materiálům** se řadí materiálové systémy na bázi vysoce pevných vláken, textilií a laminátů. Obecně platí velmi rozšířený názor, že spolehlivou ochranu proti průbojným střelám zajistí pouze tvrdý pancíř, popř. pancíř s velmi tvrdou povrchovou (čelní) vrstvou (Juříček, 2017).

Ochranný oděv je důležitý produkt technických textilií. Obsahují vysoce výkonná vlákna na bázi materiálů, jako je para-aramid (*Kevlar*, *Twaron*), polyethylen o vysoké hustotě (*Dyneema*), vyznačující se obrovskou pevností v tahu, u para-aramidu asi $2\,900\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Každý materiál má trochu jiné vlastnosti. Při výrobě vest je nejdůležitější to kolik vláken se nachází na 1cm^2 . Průměrně to bývá 9-12 vláken (Ptáček, 2007).

Pokud je střela vyrobena z relativně měkkého materiálu (lehce deformovatelné homogenní nebo expanzní střely), dochází při interakci s balistickým laminátem k

deformaci jejího těla; působící síly se tak rozloží do větší plochy a dochází k **rozptýlení kinetické energie do velkého objemu materiálu** měkkého pancíře s jejím následným pohlcením. Tím se výrazně zvyšuje pravděpodobnost zachycení střely.

V našem experimentu byly použity balistické ochranné vesty, vyrobené z následujících materiálů.

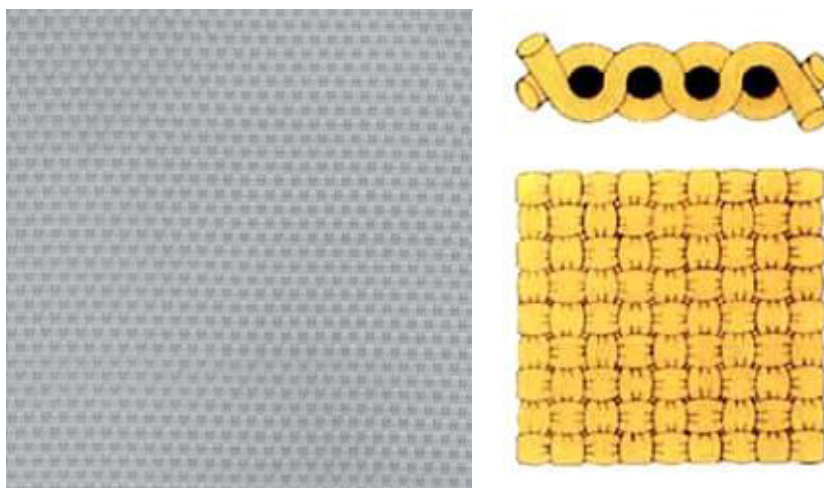
11.7 Polyaramidová vlákna

11.7.1 Kevlar (USA)

Poly (*para-fenylentereftal*) amid (*PPTA*), jehož obchodní název je Kevlar, je nejznámějším para-aramidovým vláknem. Obsahuje benzenové kruhy, takže molekula má trvale tvar tuhé tyčinky. Nemůže se ohýbat nebo dokonce svinout (Knotková, 2014). Vlastnosti kevlarové textilie jsou vysoká pevnost v tahu při nízké hmotnosti, vynikající rozměrová stabilita, nízká tažnost a houževnatost, je ohnivzdorný a samo zhášivý, dále vysoká chemická odolnost, nízká elektrická vodivost, nízké tepelné smršťování, degradace pod UV světlem (Laha, 2016).

Výroba Kevlaru je nákladná, kvůli obtížím vyplívajících z použití koncentrované kyseliny sírové potřebné k udržení ve vodě nerozpustného polymeru v roztoku v průběhu jeho syntézy a zvlákňování. Tento polymer má velmi dobrou odolnost vůči vysokým teplotám a může udržet svou pevnost a odolnost při kryogenní teplotě $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při vyšších teplotách se pevnost v tahu sníží o 1-20 %. Tepelné zpracování pod napětím zlepšuje konstrukční dokonalost.

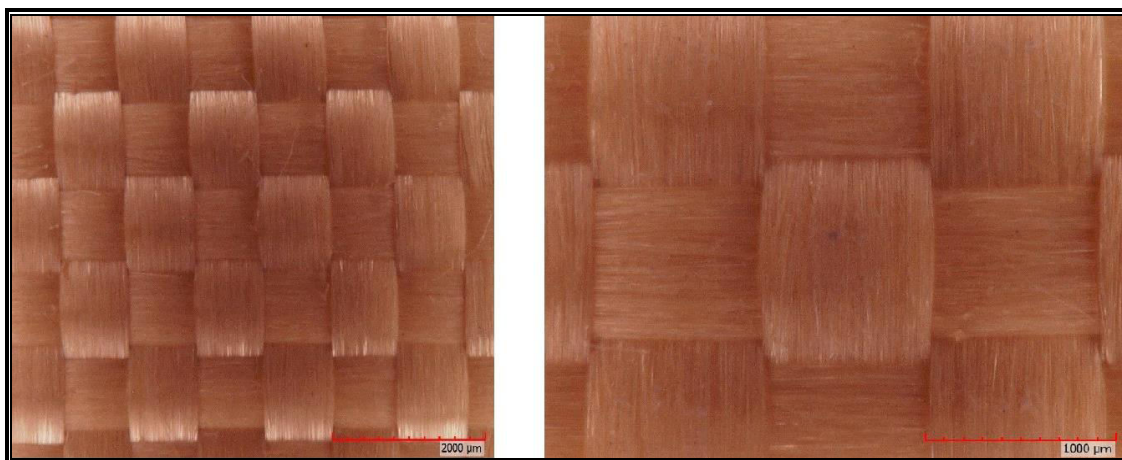
Existují tři stupně Kevlaru v našem experimentu byl použit typ Kevlaru 29, který je oproti dalším typům lehký a vhodný pro balistické vesty.



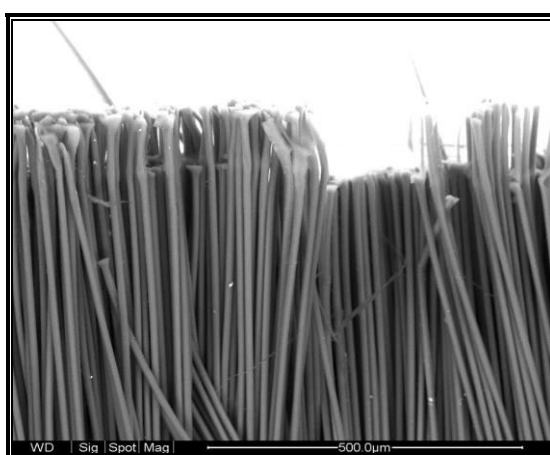
Obr. 44 Způsob tkání vlákna Kevlar (Knotková, 2014)

Centrum nových technologií a materiálů Západočeské University v Plzni, za použití optické a elektronové mikroskopie, připravilo obrazovou dokumentaci struktury vláken a úpletů testovaných materiálů.

Pro účely optické mikroskopie byl využit digitální mikroskop Hirox KH - 7700. Elektronová mikroskopie byla provedena na přístroji FEI Quanta 200 v režimu nízkého vakua pro snímání elektricky nevodivých vzorků. Vzorky pro mikroskopii byly připraveny jemným odříznutím vrstvy tkaniny s vlákny tak, aby nedošlo k narušení uspořádání vláken, nebo 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.



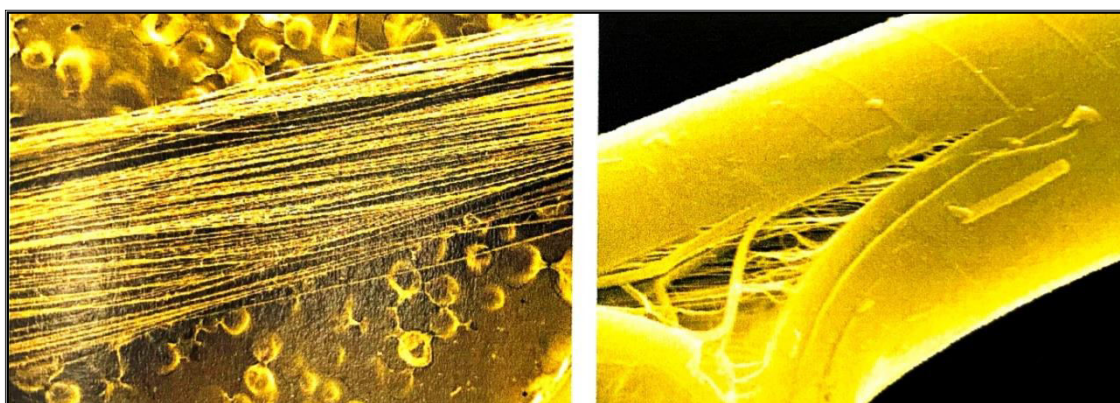
Obr. 45 Detail úpletu para-aramidových vláken tvořících vnitřní vrstvu vesty (vlevo zvětšeno 50x; vpravo zvětšeno 100x) - Optický/digitální mikroskop - Hirox. Centrum nových technologií a materiálů, ZČU Plzeň [experimentální data]



Obr. 46 Konce para-aramidových vláken/svazku - detail (zvětšeno 300x), deformace konců vláken způsobená zastřížením - Skenovací elektronový mikroskop). Centrum nových technologií a materiálů, ZČU Plzeň [experimentální data]

11.7.2 Twaron (Holandsko)

Aramidové vlákno podobné kevlaru s vysokou pevností a vysokým modulem pružnosti v tahu, nízkou hustotou a zlepšenou energetickou absorpcí a odolností vůči vyšším teplotám. je poměrně dobře chemicky odolný a elektricky nevodivý. V úpravě pro balistickou aplikaci se používá od roku 1986. Aramidová vlákna Kevlar a Twaron jsou vyráběná tažením z krystalického roztoku polyparafenylteraftalamidu v koncentrované kyselině sírové. Disponují nejlepší rázovou houževnatostí, nejnižší hustotou, velmi dobrými pevnostními charakteristikami a tlumí vibrace. Tato aramidová vlákna jsou skroucena do provazců, ze kterých je tkaná hustá, pevně stahovaná tkanina, která vnějším vzhledem připomíná těžkou plachtovitou (pytlovinu) hnědooranžové barvy (Juříček, 2017).



Obr. 47 Vlákna Twaronu pod mikroskopem (Juříček, 2017)

Tab. 13 Fyzikální a mechanické vlastnosti aramidových vláken (Juříček, 2017)

Charakteristika	Rozeř	Nízkomolekulová aramidová vlákna
Výrobce	Dupont	Kevlar 29
	Akzo	Twaron LM
Hustota	[g · cm ⁻³]	1.44
Pevnost v tahu	[MPa]	2800
Modul pružnosti v tahu	[GPa]	59
Tažnost	[%]	4.0
Specifický elektrický odpor	[Ω · cm ⁻¹]	1015
Koeficient tepelné roztažnosti	[10 ⁻⁶ · K]	- 2.3
Absorpce vlhkosti	[%]	7.0

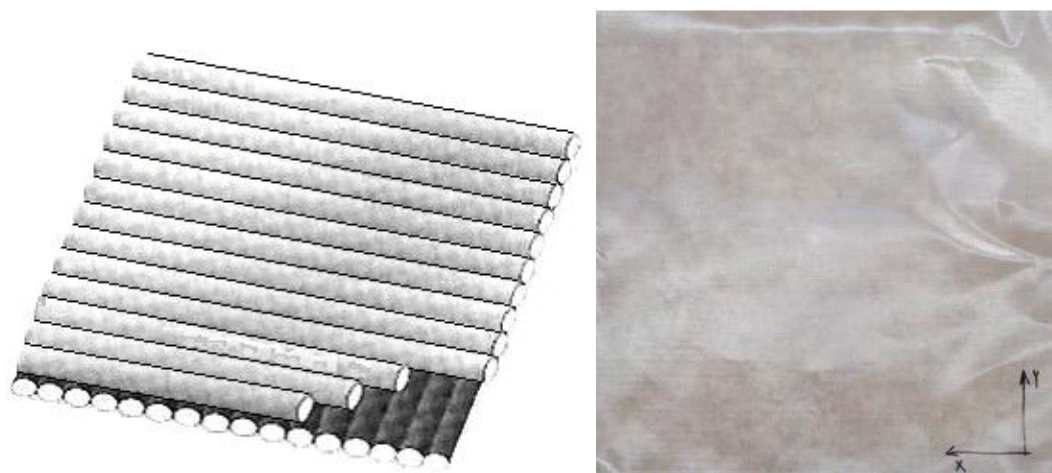
11.8 Polyethylenová vlákna

11.8.1 Spectra (Dyneema)

Polyethylenová vlákna (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene – UHMWPE*) typu Dyneema jsou vyrobené z polyethylenu s velmi vysokou molekulovou hmotností. Krystalická síť zahrnuje prodloužené řetězce s vysokou hustotou kovalentních vazeb podél všech rovin, ale s velmi slabými Van der Waalsovými vazbami na řetězci (Murphy, 2001). Dyneema je vlákno s vysokou pevností a modulem, vysokou rázovou houževnatostí, ale s nízkou hustotou. Vlákno má vysokou životnost a vynikající světelnou a chemickou stabilitu. UHMWPE je 15 x silnější než ocel a o 50 % lehčí než aramidová vlákna - Kevlar. (Park, 2004).

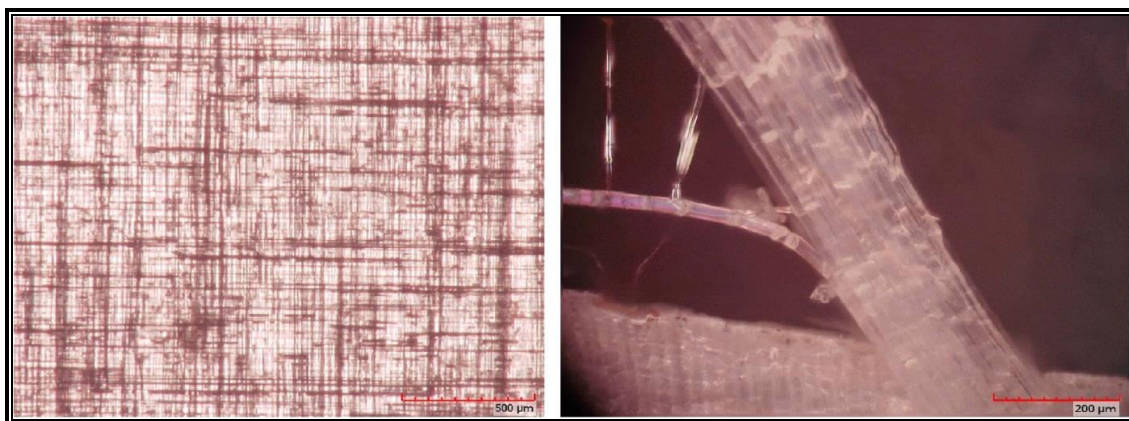
K získání vlákna UHMWPE s dostatečnou mechanickou pevností, musí být vlákno transportováno do pece. V peci se odpařuje rozpouštědlo a tažená vlákna jsou namotána na cívky. Tento materiál vyniká vysokou energetickou absorpcí, právě tento faktor je důležitou hodnotou trauma efektu, který je zde poměrně nízký.

Pro balistickou ochranu se vlákna Dyneema zpracovávají do formy tkané i netkané textilie. Ve vrstvách určených k ochraně před střelami se užívá netkaná textilie.

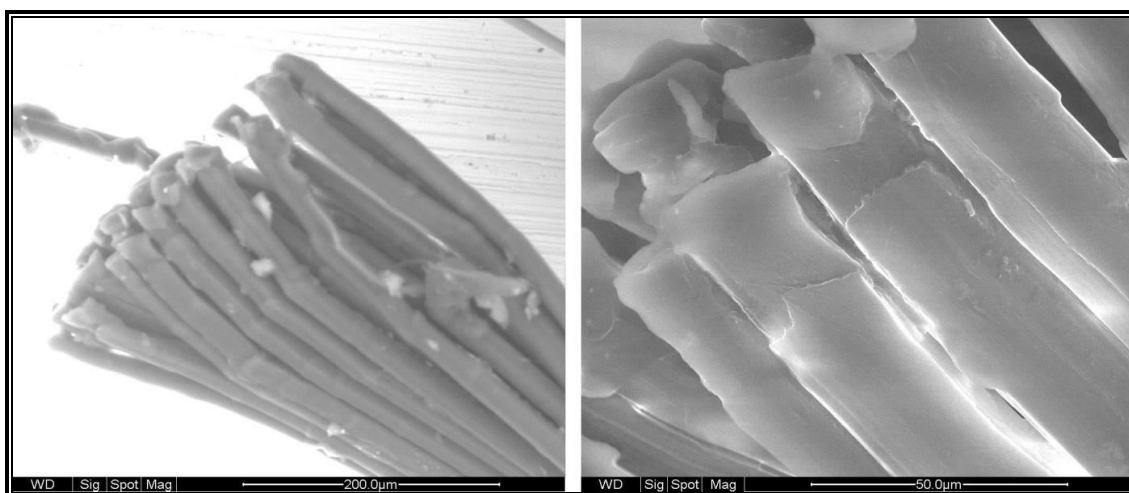


Obr. 48 Skládání vláken Dyneema v netkané textilií [experimentální data]

Vlákno UHMWPE je o 40 % silnější než Kevlar a má vysokou energii dávající významné balistické vlastnosti.



Obr. 49 Síť vláken balistické vrstvy vesty (vpravo zvětšeno 150x); svazek vláken směru X (vlevo zvětšeno 350x) - Optický/digitální mikroskop - Hirox. Centrum nových technologií a materiálů, ZČU Plzeň [experimentální data]

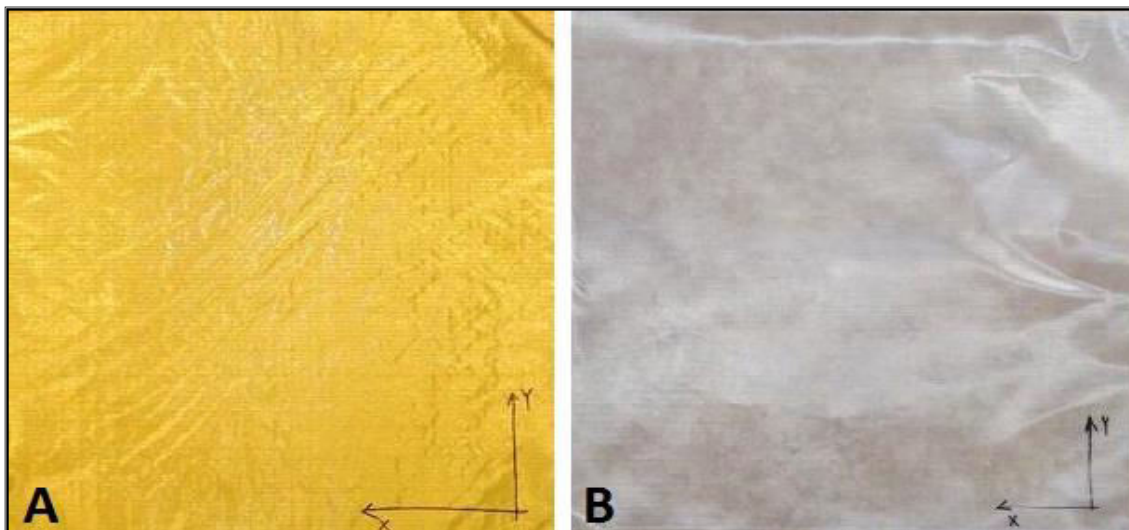


Obr. 50 Konce vláken/svazku po zastřížení (vpravo zvětšeno 600x); vlevo - detail vlákna vysokomolekulárního polyetylenu v polyesterové matrici (zvětšeno 2400x). Centrum nových technologií a materiálů, ZČU Plzeň [experimentální data]

11.9 Měření mechanických charakteristik testovaných materiálů

Měření mechanických charakteristik experimentálních materiálů bylo provedeno se vzorky tkanin ochranných vest, a to tkaniny typu A (*KEVLAR*), typu B (*DYNEEMA*), které byly dodány samostatně. Pruhy tkaniny (dále zkušební tělesa) byly připraveny z vrstev ochranných vest, které byly označeny v souladu s uvedením výše A, B.

Obr. 51 *Detail na vrstvu tkanin balistických ochranných vest (A - polyaramidové*



vlákno - Kevlar, B - polyethylenové vlákno - Dyneema) [experimentální data]

Zkušební tělesa byla připravena v šířce 5, 10, 15 mm a to vždy ve dvou sériích, lišící se orientací vláken zkušebních těles a to ve směru X a Y. Zkušební tělesa byla podrobena zkoušce a výsledné parametry a mechanické charakteristiky byly popsány na základě grafického záznamu z průběhu zkoušky. Výsledky zkoušky byly zaznamenány hodnotově a graficky, *více kapitola 15.3.*

11.9.1 Metodika měření

Zkušební tělesa byla připravena z vrstev ochranných vest A, B. Následně byla zkušební tělesa upravena ostrým řezem v rozměrech (*obrázek č. 52*)

- Vrstva A: ~2,60 x 5, 10, 15 x 230 mm (tloušťka x šířka x délka)
- Vrstva B: ~0,15 x 5, 10, 15 x 230 mm (tloušťka x šířka x délka)

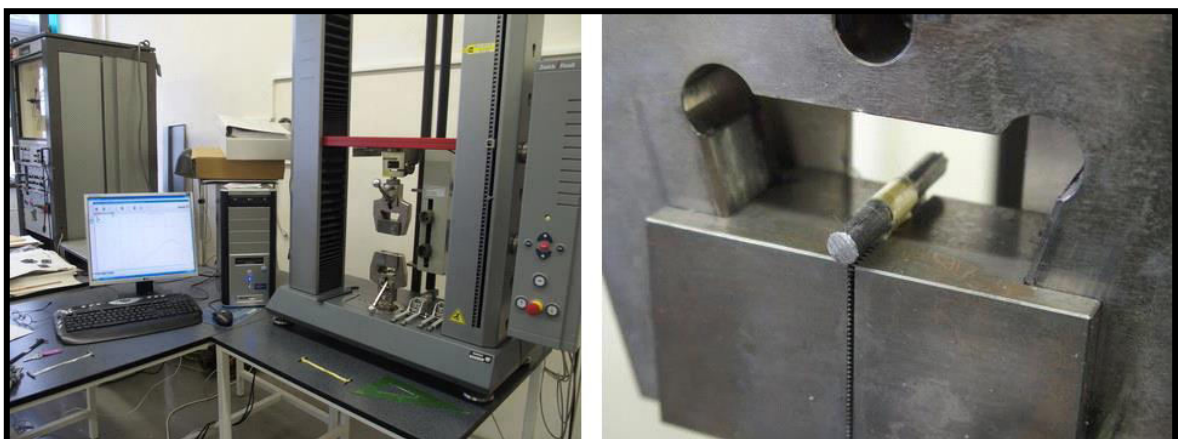


Obr. 52 *Vzorky tkanin A a B šířky 10mm, odebraných ve směru x [experimentální data]*

Kraje zkušebních těles byly přehnuty přes ocelový váleček a konce zalepeny epoxidovou pryskyřicí. Kraje zkušebních těles byly kontrolovány s ohledem na přítomnost otřepů a volných pramenů. V případě nalezení vadného zkušebního tělesa, došlo k jeho vyřazení.

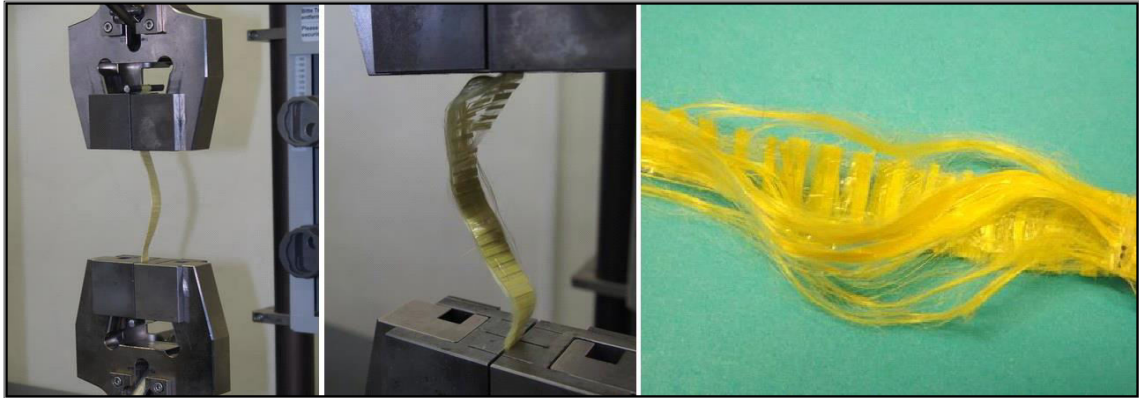
11.9.2 Popis zkoušky

Zkušební tělesa byla opakovaně přeměřena posuvným a mikrometrickým měřítkem pro stanovení přesných rozměrů tělesa. Zkušební stroj Zwick/Roell Z005, s maximální možnou zatěžovací silou 5 kN, byl nastaven na provedení zkoušky v tahu dle DIN EN 527-3. Zkušební tělesa byla ustavena mezi čelisti zkušebního stroje (dotažení čelistí).

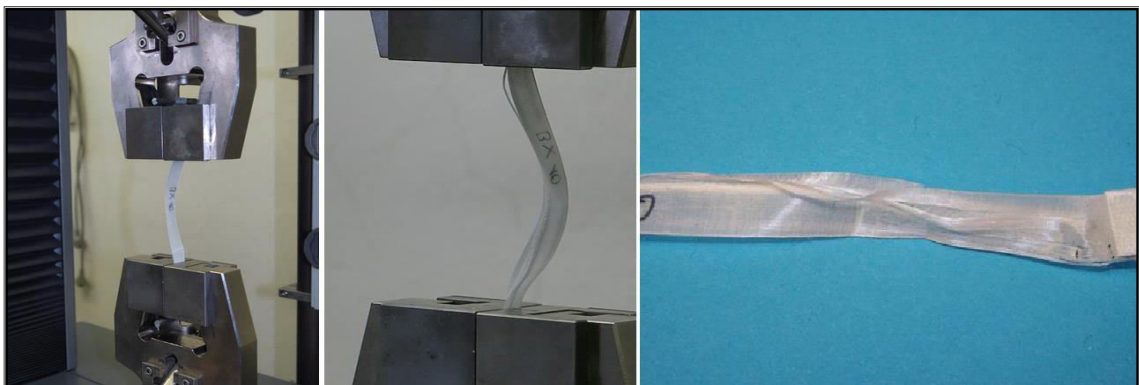


Obr. 53 *vlevo - Zkušební stroj Zwick/Roell Z005; vpravo - detail uchycení vzorku v čelistech zkušebního stroje [experimentální data]*

Dle délky zkušebního tělesa byla stanovena pracovní oblast (100 mm). Dle protokolu zkoušky bylo provedeno před-zatížení zkušebních těles 0,15 N. Byla provedena zkouška v režimu zatěžování 50 mm/min. Následně byla provedena mikroskopie experimentálních vláken. Zkušební tělesa i průběh zkoušky byl fotograficky zdokumentován (obrázky č. 54 a č. 55).



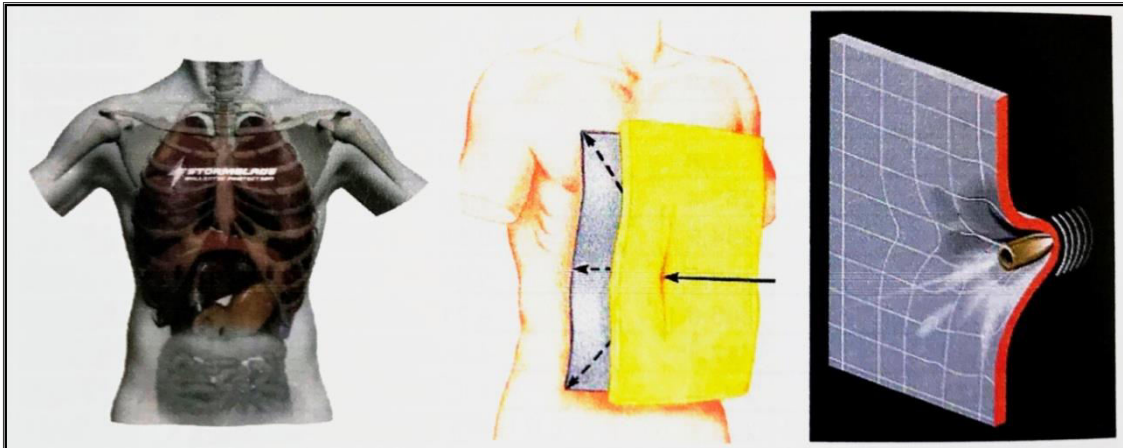
Obr. 54 Vzorek typ A - upevnění ve zkušebním stroji, stav po testu a detail poškození tkaniny [experimentální data]



Obr. 55 Vzorek typ B - upevnění ve zkušebním stroji, stav po testu a detail poškození tkaniny [experimentální data]

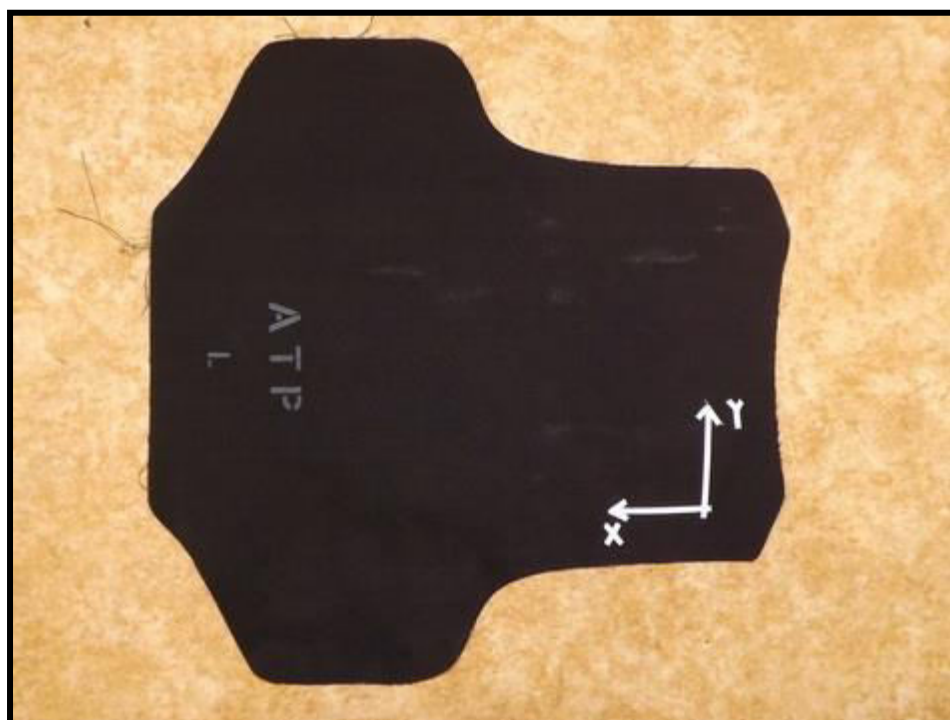
11.10 Antišoková vrstva - Traumashield

Většina renomovaných firem opatřuje své ochranné prostředky speciální vrstvou vloženou mezi tělo (vnitřní ochranný obal balistického panelu) a poslední vrstvu balistického panelu. Výrobci je označují pod různými obchodními názvy např. jako *Traumashield* (Juříček, 2017).



Obr. 56 vlevo - schématické znázornění lidského torza (frontální pohled) z umístěním vitálních orgánů, uprostřed - znázornění funkce Traumashield, vpravo - numerická simulace deformace měkkého balistického panelu pa nárazu MRS (malorážového střeliva) s využitím metody MKP (metody konečných prvků) (Juříček, 2017)

Obecně je tato vložka známá jako antišoková ochrana (obrázek č. 57). Vyráběna z polykarbonátu či aramidu - tyto materiály mají vlastní balistickou odolnost, nebo z vysokostálých polyuretanových materiálů, které balistické vlastnosti nemají, ale radikálně redukuje průhyb. Střela s vysokou kinetickou energií, ač je zcela zastavena balistickými materiály, přenechá podstatnou část své energie nositeli. Antišoková vložka je použita za účelem **zmenšení průhybu vlastního balistického materiálu** a tím dojde k velkému snížení traumatického efektu a to zmenšením objemu šokového otisku (Ptáček, 2009).



Obr. 57 Antišoková vložka vytvořená z aramidových vláken [experimentální data]

Traumatický šok je mohutný otřes organismu a podráždění nervové soustavy doprovázený prudkou depresí všech životně důležitých pochodů. Tyto změny jsou doprovázeny okamžitým ochabnutím svalstva. Tento stav je vytvořený následkem průhybu měkké balistické vesty při zachycení střely, přičemž část její kinetické energie pokračuje dále do těla chráněné osoby. Zatím není známo, zda byl někdo usmrčen přímo tímto efektem při použití standardní munice, jako je například 9 mm Luger. Jiný případ by nastal, pokud by měkkou ochranou vestu zasáhl projektil z kulovnice, který má vysokou energii a zanechal by na těle zasaženého hluboký otisk. Zasažený člověk bez antišokové vložky, u kterého nastane výše uvedený jev, se stává velmi zranitelným a může být zcela vyřazen z boje. I přes všechny tyto hrozby je známo, že mnoho policistů i ostatních příslušníků OBS si antišokovou vložku vyndávají za účelem většího pohodlí při užívání ochranných vest (Ptáček, 2007; Krupica, 2009; Juříček, 2014 in Tarasov, 2017).

11.11 Problematika posuzování účinků střely na organismus člověka za ochranným prostředkem

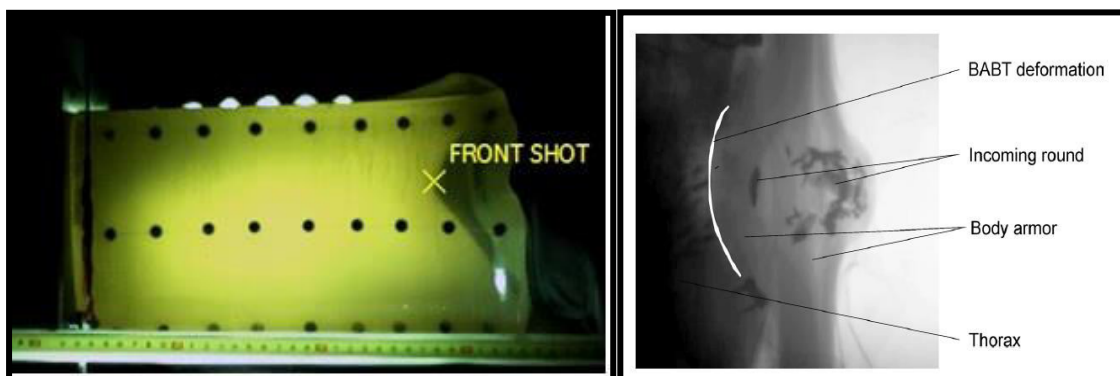
Pro splnění požadavků daného standartu musí ochranný prostředek odolat postřelování malorážové střely za přesně daných podmínek. Nejenže nesmí dojít k probití ochranného prostředku, ale v mnoha standardech se objevuje navíc požadavek na minimální hloubku vtisku v podkladovém materiálu (Juříček, 2017).

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 (viz. kapitola 16.8.). Rychlost šíření napětí je důležitá veličina pro vyhodnocení deformace stěny trupu a přenos napětí na vnitřní orgány a tím možnost vzniku vnitřních poranění.

Rázy vzniklé dopadem střely na balistickou ochranou pomůcku mohou mít vliv na centrální nervovou soustavu (CNS) přenosem přes interkostální nervy na páteř a míchu (Juříček, 2017).

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 (obrázek č. 58).



Obr. 58 Měření hloubky vtisku za balistickou ochranou pomůckou v náhradních materiálech po zkušebním vstřelu (vlevo - balistická želatina). Vpravo - zobrazení BABT u NM vyrobeného z glycerínového mýdla [experimentální data]

Hodnota hloubky vtisku by měla vyjadřovat velikost kinetické energie střely přenesené na tkáň pod balistickou ochranou v případě úspěšného zastavení střely. Omezení této hloubky vtisku je tedy také měřítkem množství energie, kterou je organismus schopen absorbovat bez výrazného mechanického poškození. Tato hodnota by měla vycházet z reálných vlastností lidských tkání. Je zde třeba zohlednit vlastní uspořádání a podmínky experimentálních zkoušek, různorodost náhradních materiálů, podmínky pro jejich kalibraci, teplotu temperování apod (Juříček, 2017).

11.12 Behind Armour Blunt Trauma (BABT)

První zmínky o tzv. BABT jsou známy z roku 1978 kdy *Carroll a Soderstrom*, zaznamenaly první případy (5 kazuistik) při zásahu policistů do jejich ochranných pomůcek vyrobených z Kevlaru. Všichni poranění přežili bez významných kardiopulmonálních následků. Prvním smrtelným případem byl zaznamenán zásah do měkké balistické ochranné vesty vysokoenergetickým nábojem .45 kalibr (Thomas, 1982). Jeden z mála detailně odpublikovatelných případů BABT je znám z roku 1995. Pracovník humanitární pomoci v Sarajevu byl zasažen sovětským nábojem ráže 14.5 mm (z neznámé vzdálenosti) do kompletní balistické ochranné pomůcky. Kromě poškození kůže a podkožních měkkých tkání, byl kardio-respiračně kompenzován. Je znám ovšem jeho RTG hrudníku, kde je sériová zlomenina žeber, drobný hemothorax s kontuzí plic (Jourdan, 1995)

BABT je specifická forma tupého poranění hrudníku (*BCT - Blunt Chest Trauma*). Experimentální studie na zvířecích objektech, počítačové modelování přenosu energie do organismu a vyhodnocení klinických dat umožnilo pochopení biofyzikálních principů BCT (Cooper & Taylor, 1989).

11.12.1 Obecná charakteristika tupého zranění

Tupé poranění může způsobit lokální, ale i vzdálené poranění v ose střely. Pohyb zasažené oblasti (hrudní, břišní stěna, apod.) přenáší energii dále do vitálních struktur. V závislosti na velikosti smykového napětí, může dojít ke kontuzi či laceraci parenchymatózních orgánů. Napěťové (stresové) vlny se budou šířit skrze vnitřní struktury, výsledkem bude zvýšení tlaku uvnitř viscerálních kompartmentů (Cannon, 2001)

Napěťové vlny ztrácejí svou energii, při styku s materiály o různých mechanických vlastnostech (akustická impedance, hustota, rychlost šíření tlakové vlny). Měkké tkáně, či orgány s obsahem vzduchu jsou velmi náchylné při přenosu vyšší energie. Při poškození alveo-kapilárního systému v plicích bude následkem kontuze plicní. Další poškození může být způsobeno tzv. *smykovým napětím*. BAPT je v současné době chápán jako základní problém při výrobě balistických ochranných pomůcek.



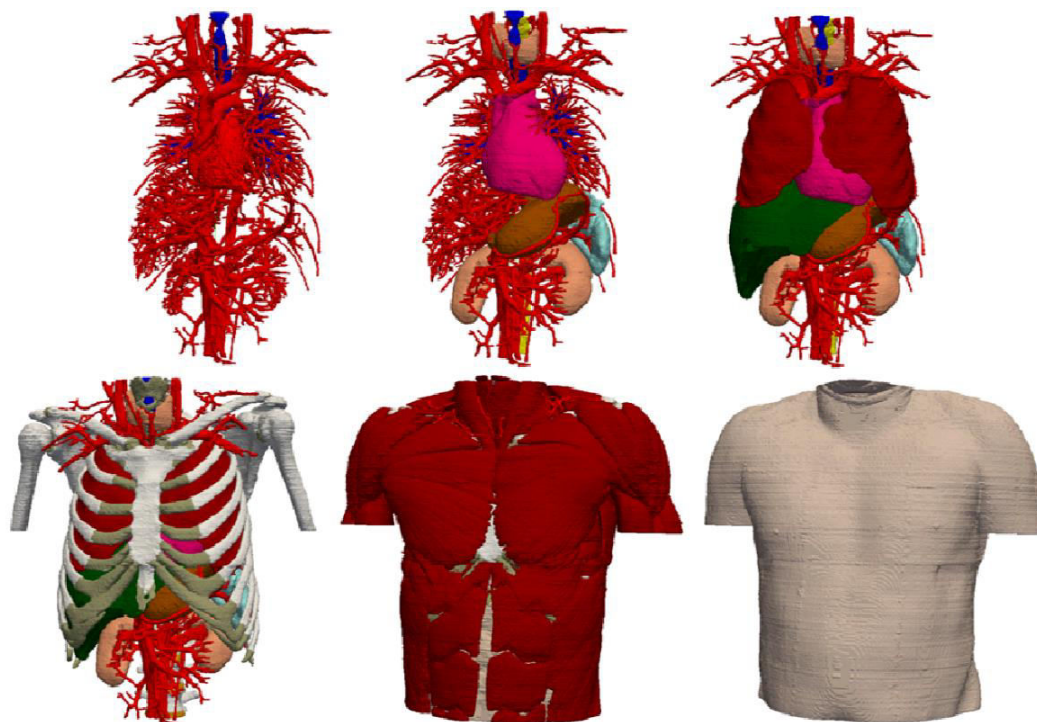
Obr. 59 *Skelet hrudníku prasete, kdy vysokofrekvenční kamera je umístěna kaudálně v oblasti břicha. Na snímku vlevo můžeme pozorovat markery umístěné v pravé polovině hemithoraxu na vnitřní straně žebel. Pravý snímek zobrazuje deformaci vč. zlomeniny několika žebel směrem do hrudní dutiny při zásahu náboje 12.7 mm do neprůstřelné balistické pomůcky NIJ III. (Cannon, 2001)*

Hlavním důvody k nárůstu BAPT v moderní době jsou zvýšená dostupnost vysoko-energetických nábojů či volný prodej nábojů s větším kalibrem dále pak cíle firem pro výrobu ochranných pomůcek vyhovět jejím uživatelům v komfortu při nošení pomůcky, snížení hmotnosti a její tloušťky. Všechny tyto faktory mají za následek větší podíl kinetické energie vytvořené při impactu za balistickou ochranou.

11.12.2 Modelování BAPT pomocí počítačové simulace

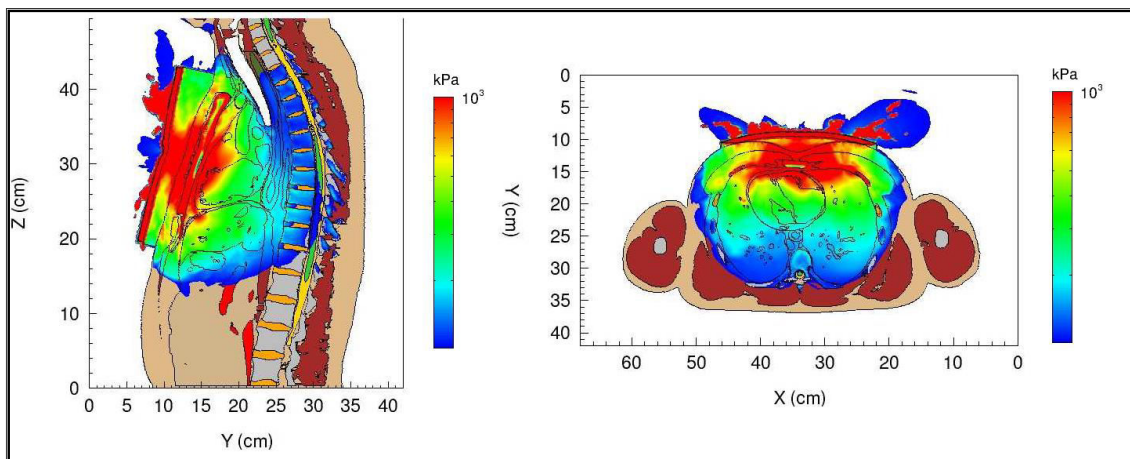
V současné době již lze doposud užívané balistické materiály nahradit, pomocí předexperimentální numerické simulace včetně vzniku trauma efektu při dynamickém působení zbraňového systému. Jakékoliv balistické testování na živém organismu je v rozporu s etickou komisí, proto se mnoho pracovišť snaží balistické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

Geometrický model byl založen na základě *National Library of Medicine's Visible Human* - modelování mužského pohlaví (National Institutes of Health, 2007). Model je zkonstruován pomocí 495 segmentů o tloušťce 1 mm snímaných v axiální rovině. Model obsahuje 19 typů různých orgánových soustav vč. kosti, chrupavek, meziobratlových disků, vaskulárního systému, dýchacích cest/vzduchu, plic, jater, ledvin, sleziny, srdce, svalů, hrtanu, žaludku, obsah žaludku, míchy, cerebrospinální tekutiny (CSF), štítné žlázy, obsahu břišní dutiny, kůže a tuku. Model trupu existuje v podobě konečných prvků, složených zhruba z 42 mil. prvků s použitím Eulerian, Lagrangian, nebo kombinací Lagrangian-Eulerian kódů (Cooper & Taylor, 2015).



Obr. 60 Vývoj počítačového modelu lidského torza jenž je součástí vývojové divize *Sandia Eulerian shock wave physics code* (Cooper & Taylor, 2015)

Model hrudníku byl při experimentálním zkoumání opatřen balistickou ochranou pomůckou obsahující balistický materiál KEVLAR o celkové tloušťce 1.5 cm. Projektil simulující impakt byl kalibru 9 mm FMJ.



Obr. 61 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.

12 POUŽITÉ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ A ZOBRAZOVACÍ METODY

12.1 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. 62 *Interiér balistické laboratoře Prototypa - ZM s.r.o., Brno*
[experimentální data]

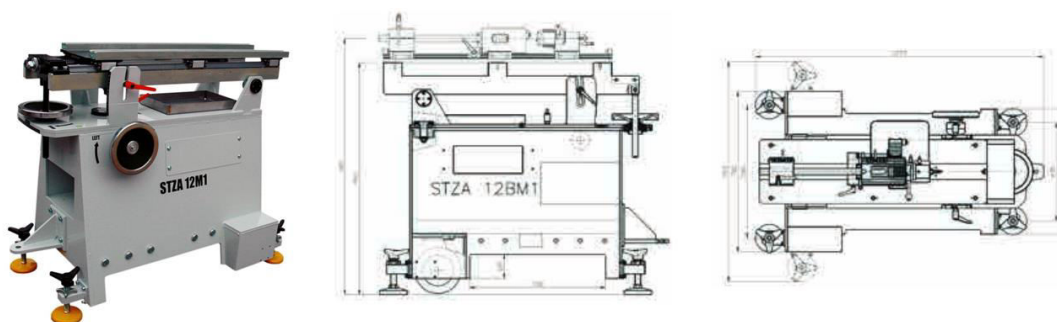
Experimenty probíhaly v balistickém tunelu sloužící k testování nejen ručních zbraní, dále pak k testování ochranných materiálů v souladu s normami **STANAG 2920**, **AEP-55**, **NIJ 0101**.

12.2 Použité zkušební a měřicí zařízení

V souladu se stanovenými cíli byla příprava experimentů zaměřena na sestavení metodiky výběru a hodnocení NM a provedení některých simulací ranivých účinků střel malých ráží na živou sílu s využitím fyzikálních modelů.

12.2.1 Mobilní střelecká stolička STZA 12BM1

toto zařízení je určeno pro pracoviště a specializované na balistické testování. Zařízení je určeno pro univerzální balistický uzávěr. Tato plošina neobsahuje systém zpětného rázu. Mezi hlavní technické parametry patří: *výška* - 1000 mm; *délka* - 1270 mm; *hmotnost* 350 kg; *maximální velikost* balistického uzávěru 12,7 mm. Plošina, byla nastavena při experimentu 4,5 metru od balistického bloku. Byla umístěna tak, aby následné nastavení balistického uzávěru, bylo schopno přizpůsobit dráhu střely, přesně do středu balistického bloku náhradního materiálu.



Obr. 63 Mobilní střelecká stolička STZA 12M1 [experimentální data]

12.2.2 Balistický uzávěr UZ-67 UNIVERSAL

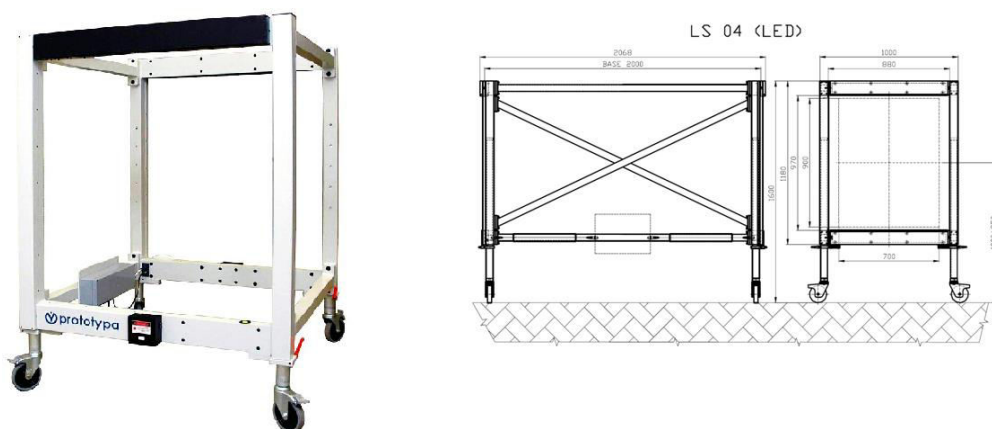
Slouží k upínání balistických hlavni pro zkoušení střeliva - pušky, pistole, revolvery a další palné zbraně. Hlavní technické parametry jsou výška 130; délka 350 mm; celková hmotnost 13 kg. Díky stabilnímu uchycení uzávěru na mobilní plošinu, eliminujeme chyby vzniklé lidskými faktory (nepřesnost zásahu, třes, vegetativní či neurogení vlivy, ohrožení lidského zdraví jedince). Součástí každého uzávěru je laserový zaměřovač, kterým jsme schopni před výstřelem kalibrovat dopad munice, přesně do stanoveného místa náhradního materiálu. Výhodou je to především, při aplikaci neprůstřelné vesty o větším vnějším rozměru než je samotná balistický blok. Přítomný personál, byl při střeleckém pokusu, chráněn balistickou bránou a dalšími ochrannými prostředky (sluchátka). Edukovaný zaměstnanec balistické laboratoře, pomocí tahu za odpalovací lano, zapříčinil výstřel v plánovaný okamžik.



Obr. 64 *Balistický uzávěr UZ-67 jako alternativa použité zbraně [experimentální data]*

12.2.3 LS-04 Doule Intelligent Light Gates

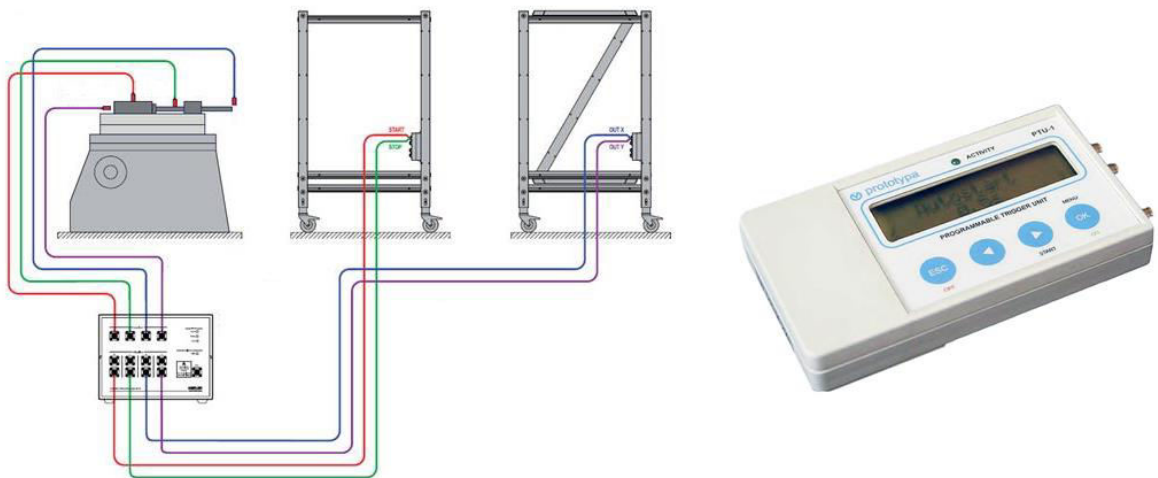
Inteligentní světelné závory LS04 slouží k měření rychlosti projektilů a výstřelu. K dispozici jsou dvě modifikace LS04 (LAS) a LS04 (LED). Inteligentní světelné závory LS04 pracují na principu snímání projektilu, který proletí dvěma světelnými závory pevně uchycenými ve své základně. Jakmile projektil proletí první brankou, zaznamená se signál **START**, při průletu přes druhou bránu je následně zaznamenáván signál **STOP**. Pomocí časoměru zaznamenáváme čas mezi světelnými oběma branami. V průběhu průletu projektilu je možno zaznamenat jednotlivé časové intervaly. Zařízení obsahuje integrovanou vyhodnocovací jednotku založenou na průmyslovém počítači, který zajišťuje měření časových intervalů a jejich následným přepočítání na skutečné hodnoty měřených veličin. Technické parametry: Měřitelná rychlost projektilu v rozmezí 50-2000 m/s; frekvencí v rozsahu rozsah 60-3000 ot/min a s přesností 1%.



Obr. 65 *Optická hradla pro měření rychlosti [experimentální data]*

12.2.4 PTU-1 Programmable trigger unit

Pomocí PTU jednotky dochází k synchronizaci použitého zařízení v našem balistickém experimentu. Ovládá funkci spuštění balistických měřících a nahrávacích zařízení jakou jsou - vysokorychlostní kamera, LED osvětlení vč. blesku, radary pro měření rychlosti. PTU jednotku je spuštěna akustickým signálem nebo externím napěťovým signálem s naprogramovatelným zpožděním. Umožňuje výpočet spouštěcí doby fotografie v reálném čase. Velmi elegantní měření jednotlivých rychlostí se spojením optických světelných závor. Toto zařízení bylo ovládáno pomocí několika málo tlačítek a vestavěného LCD displeje.



Obr. 66 *Stručné schéma synchronizační PTU-1 jednotky v reálném experimentu [experimentální data]*

12.2.5 DRS-1 Doppler radar system

Specializovaný radar, který využívá Dopplerova efektu tj. změna frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému signálu, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače. Vysílač pracuje na principu odrazu mikrovlnného signálu od měřitelného cíle a analyzuje, jak pohyb objektu změnil frekvenci vrácenému signálu. Radarový systém Doppler je zařízení určené pro měření rychlosti projektilů. Mezi hlavní technické parametry patří - rychlostní rozsah mezi $50-2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; frekvence 24.15 GHz, přesnost 0,2%.



Obr. 67 DRS-1 Doppler radar system [experimentální data]

12.3 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.

12.3.1 Základní princip CT

Počítačová tomografie (*computed tomography – CT*) je zobrazovací technologie založená na rentgenovém záření. Tato neinvazivní metoda umožňuje detailně zobrazovat nejrůznější materiály, jejich struktury a povrchy, ale hlavně zobrazení specifických tkání a orgánových struktur v organismu či těle drobných živočichů. Limitující je dávka záření, kterou je nutno zvyšovat s požadavkem na vyšší rozlišení (Ritman, 2007).

CT je založené na detekci paprsku rentgenového záření oslabeného při průchodu tkání (Hounsfield, 1973). Dokáže proto bez problémů zobrazit především tvrdé tkáně – kosti a zuby. Za použití kontrastních látek je ale možné tuto metodu použít i pro vizualizaci měkkých tkání. Následné počítačové zpracování nasnímaných dat umožňuje rekonstruovat jednotlivé řezy a dnes už i vytvářet trojrozměrné modely tkání a orgánů.

Během snímání pomocí počítačové tomografie je zkoumaný objekt prozařován rentgenovými paprsky vycházejícími z tzv. rentgenky („*X-ray tube*“). Rentgenové paprsky zde vznikají po urychlení elektronů ve vakuu vysokým napětím a jejich dopadu na anodu (Schambach et al., 2010). Rentgenka je připojena na konstrukci umožňující rotaci kolem snímaného objektu, úhel rotace závisí na typu přístroje. Jsou využívány stroje s rotací např. 180°, 360°, ale i stroje se spirálovým pohybem kolem objektu („*spiral CT*“). Naproti rentgence je ke konstrukci připojen detektor, snímající

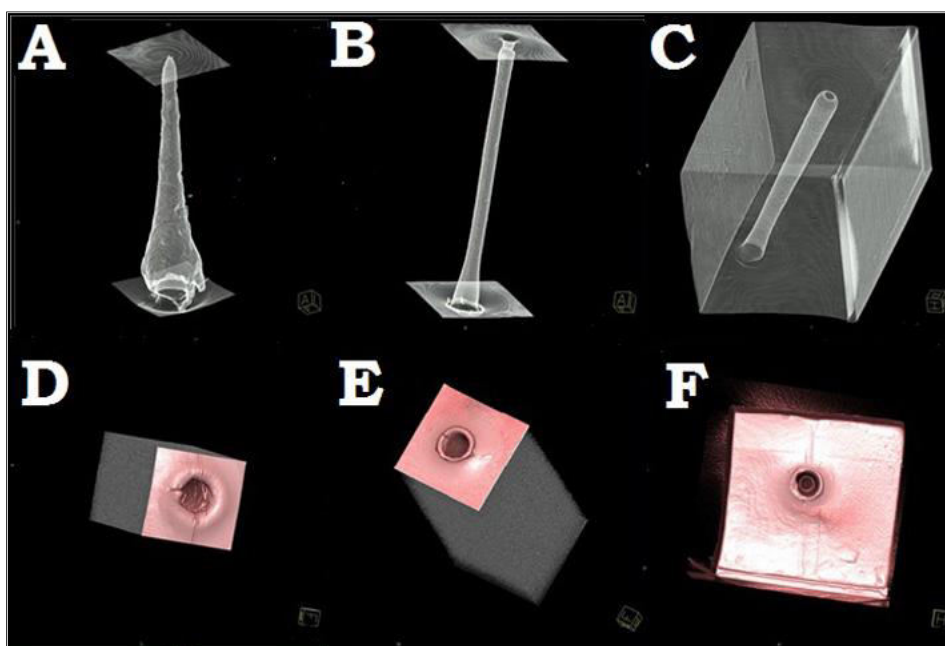
dopadající zbytky rentgenového záření, které bylo oslabeno průletem přes skenovaný objekt, neboli měří absorpci. Podstavec, na němž je uložen snímáný objekt se po každém měření o kousek posune a postupně je nasnímán celý objekt.

Výsledkem jsou po sobě jdoucí 2D řezy v definovaných paralelních rovinách, díky kterým máme představu o stavu vnitřních orgánů a především o jejich přesné poloze (Dudak et al., 2015; Hounsfield, 1973; Lauridsen et al., 2011). Nasnímané 2D řezy jsou poté složeny pomocí výpočetní techniky do 3D rekonstrukce objektu, sloužícího pro následné analýzy a tvorbu virtuálních řezů.

12.3.2 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).

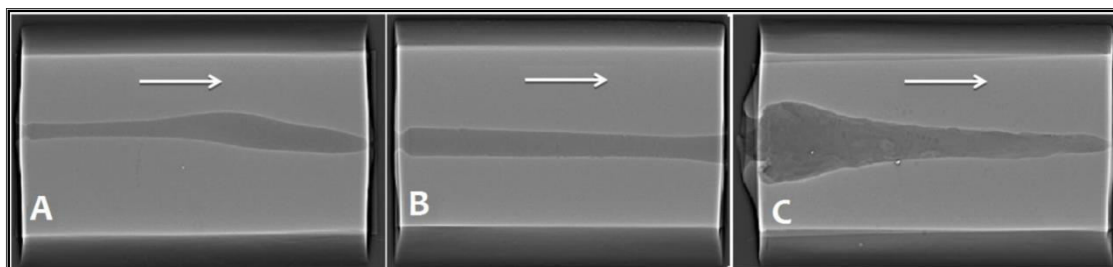
Pro vytvoření 3D modelu jsme použili experimentální data, která jsou nejčastěji dostupná ve standardním komunikačním a datovém formátu **DICOM 3.0**. Běžné rozlišení CT snímků je 512x512, počet snímků v jednotlivých řezech se pohybuje na úrovni 100 ~ 200. Přesnost snímání je na úrovni až 0,5 ~ 1 mm.



Obr. 68 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

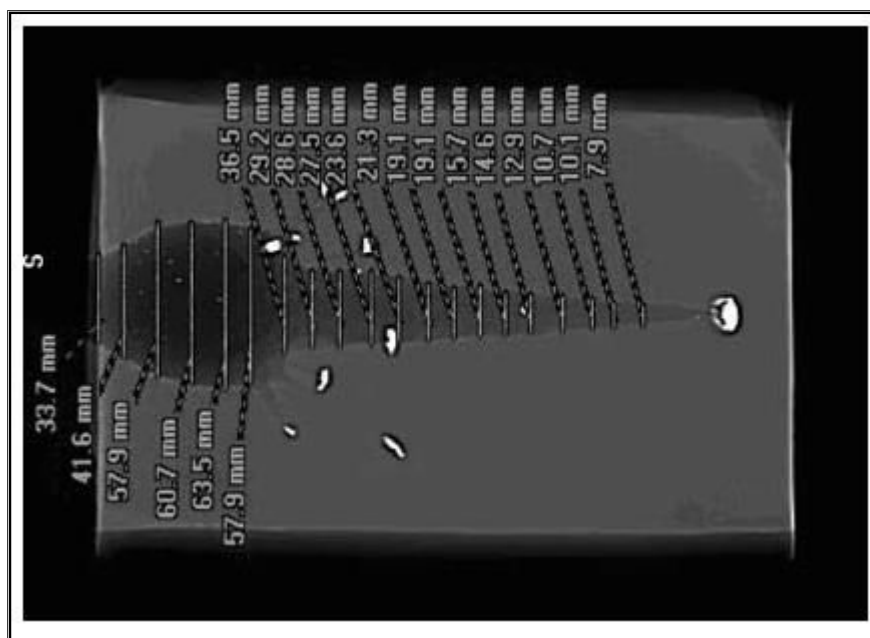
V mnohých dřívějších studiích (Fackler & Malinowski 1985; Sellier & Kneubühl 2001; Jussila 2004) se vzorky dále zpracovávají rozřezáváním pomocí ocelové struny, aby bylo možné parametrizovat i vnitřní plochy náhradních materiálů. V našem experimentu mimo jiné hodnotíme tyto parametry pomocí moderních diagnostických metod. Bloky musely být zabezpečeny pro transport v chladicích boxech.



Obr. 69 a) Velikost dutin v náhradním materiálu - glycerínové mýdlo. Snímky pořízené počítačovou tomografií (CT). Šipky ukazují směr letu střely [experimentální data]

Legenda: A – 9 mm Luger FMJ-RN, B - .357 Magnum FMJ-FP, C - .357 Magnum GOLD DOT

Na obrázku č. 69 je zobrazen pohled na trvalou dutinu vytvořenou po impaktu v náhradním materiálu - glycerínové mýdlo. Rekonstrukcí různých rovin obrazů, jsme byli schopni vyhodnotit jednotlivé průměry v průběhu stělného kanálu á 10 mm ve směru dráhy letu.



Obr. 69 b) Předozadní projekce pro náboj .357 Magnum Gold DOT, parametrizuje jednotlivé průměry á 10 mm ve směru dráhy letu (Juříček, 2010)

poznámka: Na snímku jsou zobrazeny hypersignální ložiska představující jednotlivé fragmenty střely vč. deformované střely v NM

12.4 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).

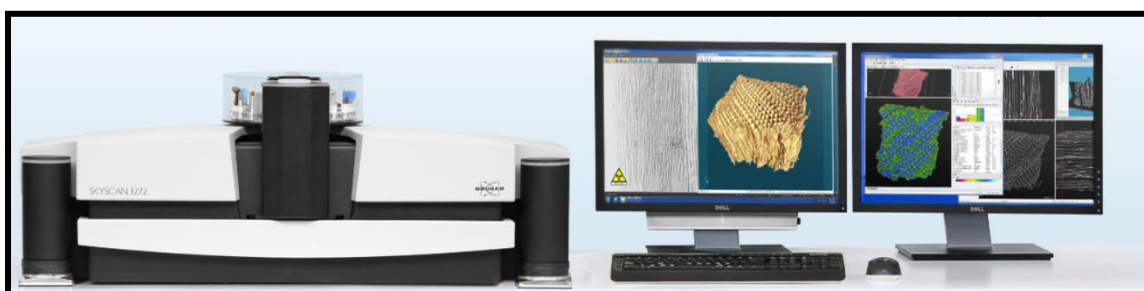
12.4.1 Vznik a principy mikro-CT

CT se rozvíjí velmi rychle hlavně v oboru medicíny. Není divu, že mikro-CT se vyvinulo původně právě jako zobrazovací metoda pro organismy menší než je člověk a jemu podobní (de Crespigny et al., 2008). Pro tělesnou velikost člověka dostačuje prostorové rozlišení 1 voxel = 1 mm^3 (*1 voxel je bezrozměrná prostorová jednotka, stejně jako pixel v ploše*). Pro organismy menší potřebujeme ale vyšší rozlišení než v mm^3 . Proto se od 80. let 20. stol. rozvíjí mikro-CT (Ritman, 2004; Ritman, 2007; Cosmacini & Piacentini, 2008).

Mikro-CT dosahuje rozlišení 50 – 1 μm na 1 voxel, což postačuje detailních zobrazení objektů a pro skenování orgánů a jejich základních funkčních jednotek. V přístrojích mikro-CT je rentgenka a detektor umístěny staticky, zatímco vzorek rotuje kolem vertikální nebo horizontální osy. Zvětšení je zajištěno buď přímo skenovacím paprskem ve tvaru kužele („*cone beam CT*“ nebo „*volume-CT*“), anebo optickou technikou umístěnou před dopadem paralelních rentgenových paprsků na detektor.

12.4.2 Mikro-CT s vysokým rozlišením - Skyscan 1272

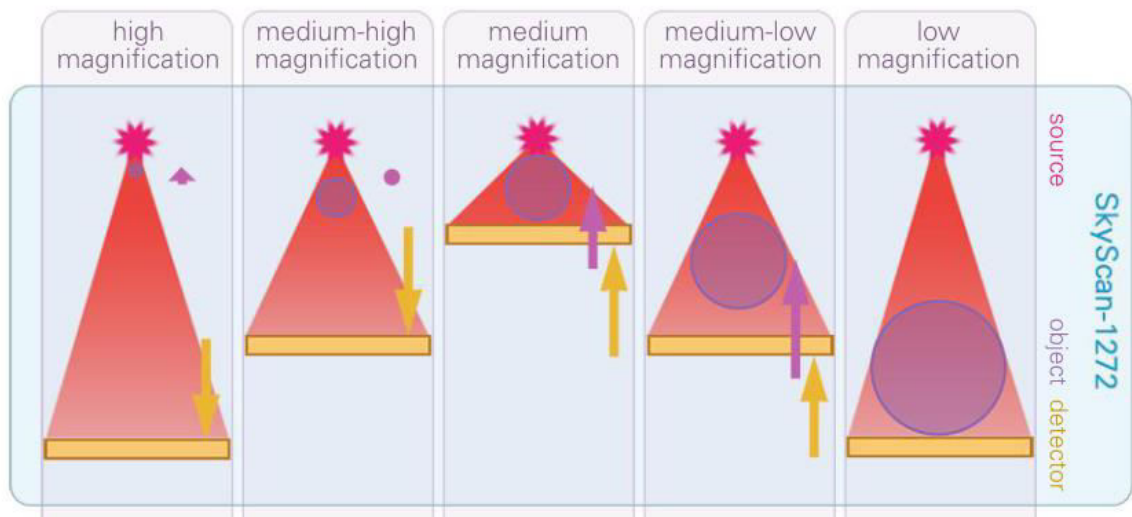
Mikropočítačová tomografie nebo "*mikro-CT*" je zobrazování rentgenovým zářením ve 3D, stejnou metodou, jakou se používá při vyšetření CT (*nebo "CAT"*) v nemocnici, avšak v malém měřítku s výrazně větším rozlišením. V našem experimentu bylo použito zařízení **Skyscan 1272**.



Obr. 70 SkyScan - 1272 stolní CT-mikrotomograf s vysokým rozlišením a automatickým měničem vzorků [experimentální data]

Zařízení dokáže nedestruktivním způsobem vizualizovat až 209 megapixelů (*Mpx*) (14450 x 14450 pixelů) virtuálních řezů skrze snímání objekt. Vývoj nových snímacích rentgenových detektorů 16Mp a 11Mp ve třech posunutých polohách. Dále pak díky vylepšenému fázového kontrastu je detailní detekovatelnost 0.35 μm (16 Mp)

nebo 0.45um (11Mp) při nejvyšším zvětšení. Radiační bezpečnost <1 μSv / h při vzdálenosti 10 cm od povrchu přístroje. Pomocí jednoho snímání jsme schopni zrekonstruovat až 2600 řezů. Každý vzorek musel být upraven na výslednou velikost 75 x 75 mm. Velkoformátové zobrazování bylo podpořeno nejrychlejší hierarchickou (*InstaRecon®*) s vícevlákovou 3D rekonstrukcí a realistickou vizualizací pomocí povrchového a objemového vykreslování (*obrázek č. 71*).



Obr. 71 Variabilní skenovací geometrie pro nejlepší skenování při libovolném zvětšení [experimentální data]

12.4.3 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).

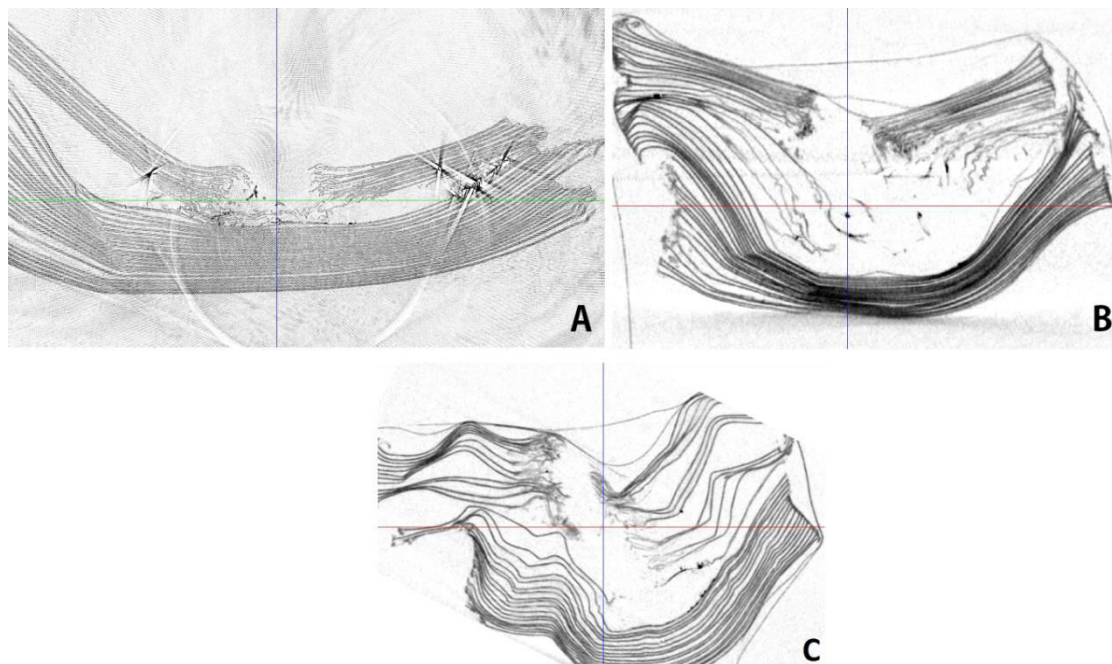
CT snímající absorpci rentgenových paprsků ve vzorku dokáže zobrazit především kontrast mezi strukturami, které se v absorbanci liší. Proto můžeme dobře vizualizovat povrchy zkoumaných vzorků (Lauridsen et al., 2011).

Závisí na typu konstrukce mikro-CT, zda získáme paralelní řezy vzorkem anebo rovnou obraz celého vzorku (Schambach et al., 2010). Dříve se při tradičním paralelním snímání vyhodnocovaly jednotlivé řezy. Dnes jsou ovšem po snímání údaje z každého voxelu složeny do 3D modelu, z něhož můžeme pomocí počítače generovat řezy libovolnými rovinami nebo izolovat jednotlivé struktury a odlišit je přidáním barvy (Dinley et al., 2010).

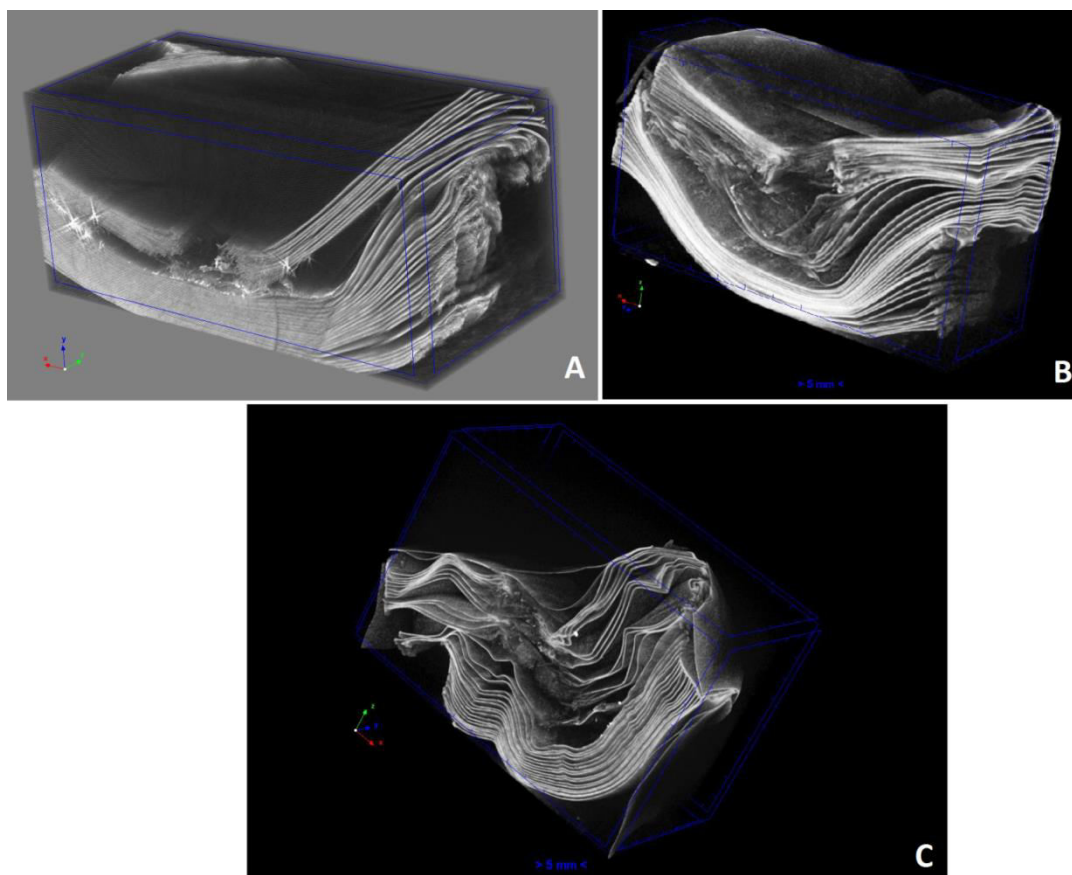
Na *obrázcích č. 72 a 73* níže lze vidět frontální řezy zkoumaných vzorků balistické ochranné pomůcky z polyethylenového vlákna **UHMWPE** a odpovídající balistické třídy odolnosti NIJ III.A složené z 30-ti vrstev. Na detailních snímcích jsme

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, hloubku 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. 72) kde lze pozorovat kontaminaci vzorku střelným prachem a zbytky fragmentů střely (v pravé části obrázku A).



Obr. 72 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. 73 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]

12.4.4 Návrhy k dalšímu výzkumu v ranivé balistice pomocí CT

Na základě předložené fotodokumentace lze konstatovat, že CT a mikro-CT jsou metody mimořádně výhodné při snímání vytvořených profilů při zásahu různými zbraňovými systémy. Zároveň možnosti parametrizovat složité struktury nejen lineárně, ale i objemově, tvoří z těchto metod skvělý exaktní nástroj pro vyhodnocování morfologických a strukturálních ve snímaném objektu. Moderní technologie a software pro vizualizaci profilů, umožňují získání cenných informací, aniž bychom museli balistický blok, jakkoli mechanicky upravit. Konkrétní **vytvořené profily** v balistické ochranné pomůcce **dávají určitou představu** o tom, jaké **poranění může být očekáváno**. Následné zpracování těchto výsledků může mít dále význam i pro konstrukci balistických ochranných systémů.

12.5 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.

Podle použité snímací technologie se 3D skenery dělí na mnoho typů. Nejčastěji se ovšem používá základní rozdělení na bezkontaktní a dotykové 3D skenery, přičemž naše společnost nabízí zástupce obou kategorií.

12.5.1 HandyScan 3D 700TM

Ruční samopolohovací laserový skener HandyScan 3D od společnosti **CREAFORM** je přenosný 3D skener, který během snímání umožňuje vzájemný pohyb skeneru a tělesa (*obrázek č. 74*) HandyScan 3D identifikuje poziční značky na tělese nebo podložce a pomocí dvou kamer snímá laserový kříž na tělese. Na počítači se v reálném čase zobrazuje obraz snímání, těleso a laserový kříž a automaticky se generuje polygonová síť. Naskenovaná data se dají upravovat ve speciálních programech. Některé programy umí polygonovou síť načíst jako grafiku k prohlížení, nebo sken naimportovat a provádět na něm základní operace jako je 2D řez, prokládání geometrických entit, tvorba **NURBS povrchů** atd.



obr. 74 HandyScan 3D 700 laserový skener od společnosti CREAFORM
[experimentální data]

12.5.2 Využití

Výsledná data jsou dále zpracovávána pomocí software, které předává naskenované data na 2D nebo 3D těleso a vytváří tak plně parametrický 3D model. Následně naskenované data lze použít přímo pro vyhodnocení odchylek tvarů, rozměrů či velikost dutiny v neprůstředné vestě. V našem experimentu došlo pomocí 3D modelace průhybu balistické ochranné pomůcky na následné polygonové síť v 3D prostoru reprezentovaných souřadnicemi X, Y, Z k vytvoření modelu, který byl následně dále zpracován.

Za použití 3D dat jsme schopni pomocí 3D tiskárny zhotovit fyzický model vytvořeného průhybu. Tento model může posloužit k reálné představě o množství traumatizované tkáně po balistickou ochrannou a tím poukázat na predikci zranění jednotlivým nábojem.

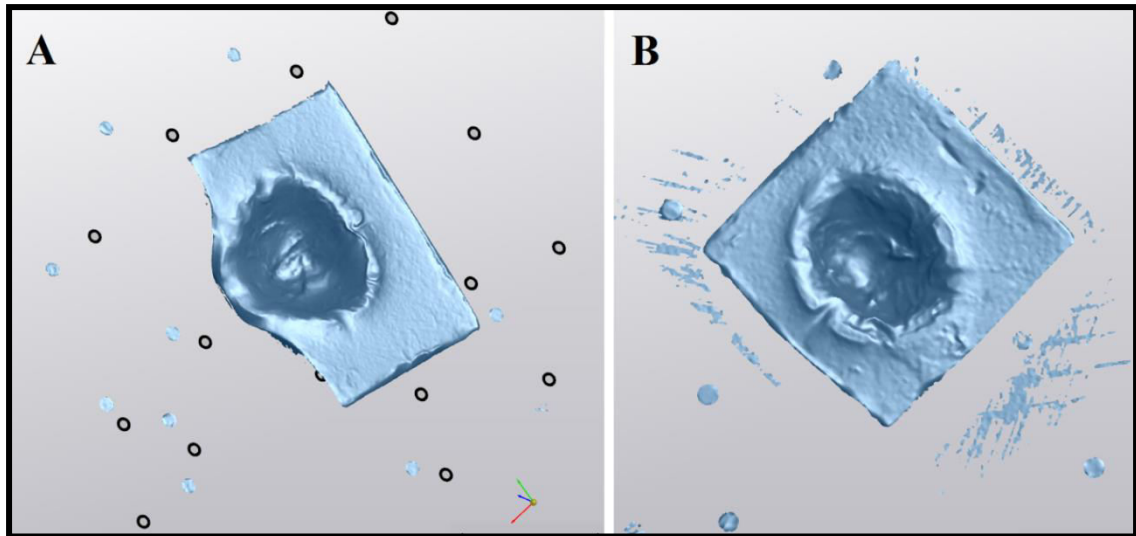
12.5.3 Technické parametry

Tab. 14 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

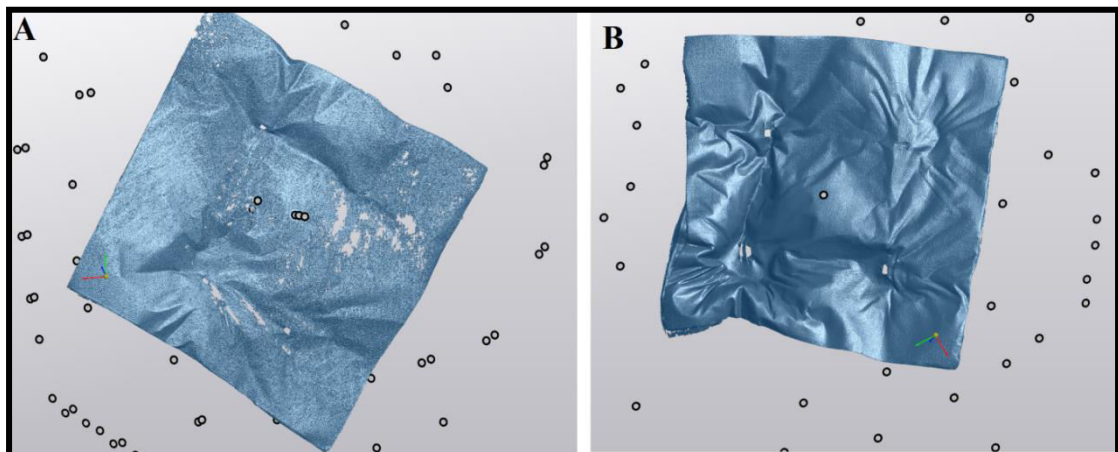
pozn: * podle standardu ISO 10360 je volumetrická přesnost definována jako hodnota závislá na velikosti

12.5.4 Software dokumentace experimentální munice



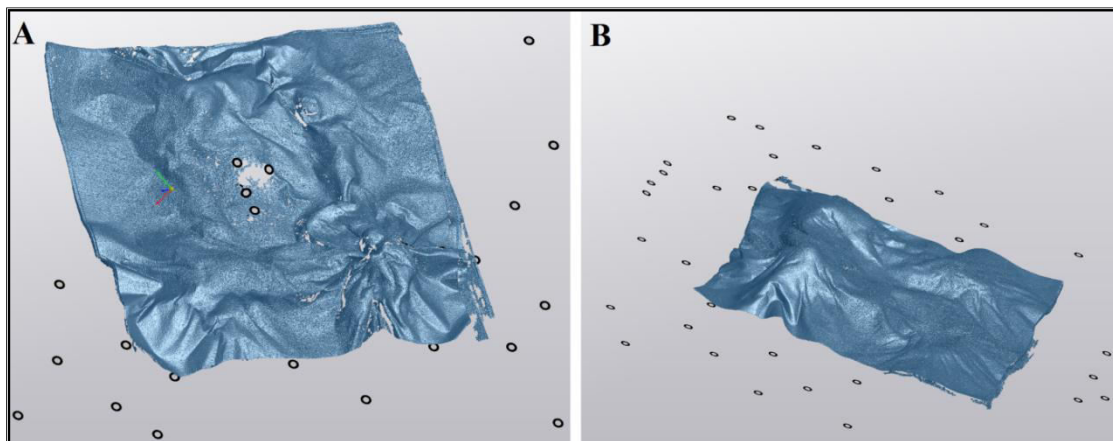
Obr. 75 Pomocí software - VX elements zpracované konkávní dutiny v glycerínovém mýdle po zásahu experimentálních střel [experimentální data]

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



Obr. 76 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. 77 *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*

12.6 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.

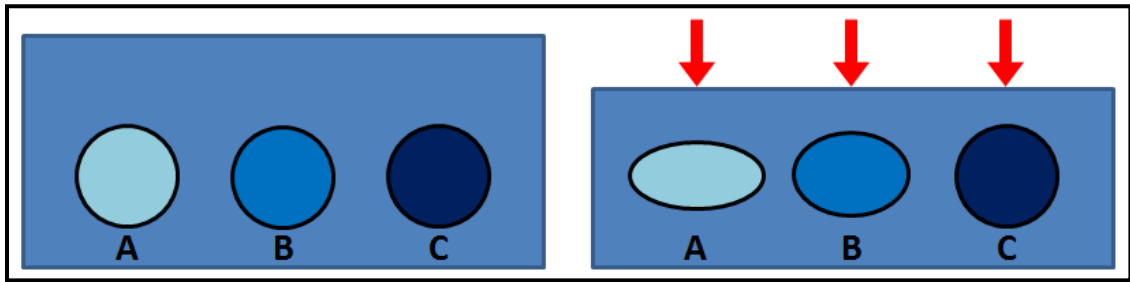
Ultrazvuková elastografie založená na mapování elastických vlastností tkání je proto velmi výhodnou metodou pro zobrazení struktury a patologie jednotlivých tkání. Měření elastických vlastností tkání přináší zcela novou informaci o tkáních, kterou lze s výhodou využít i pro balistické účely, kdy známe 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 (Sedlář et al., 2013)

12.6.1 Mechanické vlastnosti látek

Za mechanické vlastnosti látek považujeme takové vlastnosti, které popisují odolnost látky vůči silovému namáhání. Z hlediska elastografických metod je pro popis biologických tkání nejdůležitější mechanickou vlastností samozřejmě pružnost (elasticita). Biologické tkáně vykazují **viskózně-elastické vlastnosti**, tj. vlastnosti pevných látek i kapalin. Kromě toho se u biologických tkání projevuje vliv historie zatěžování (paměťový efekt), adaptabilita na základě zpětné vazby, změny mechanických vlastností důsledkem stárnutí nebo otevřenost systému (Fung et al., 2009).

Vlastnosti biologických tkání člověka jsou značně individuální a závislé na okamžitém stavu jedince a jeho komplexní historii. Popis mechanických a hlavně elastických vlastností biologických tkání je tedy na rozdíl od neživých struktur velmi složitý a pro modelování a výpočty vyžaduje značné aproximace a zjednodušení.



obr. 77 *Komprese struktur s různou elasticitou: velmi měkká struktura (A), měkká struktura (B), tuhá struktura (C). Komprese tkáně v jednom směru obvykle vede ke změně rozměru struktury ve směru kolmém na směr působící síly (Sedlář et al., 2013)*

Typické hodnoty *Youngova modulu* pro vybrané biologické tkáně, jsou uvedeny v tabulce. Patologické tkáně vykazují zpravidla větší tuhost než zdravé tkáně. Elastický modul zdravé tkáně (prsni tkáň, ledviny, játra, prostata) se pohybuje v rozsahu asi 0,15 až 0,75 MPa; hodnoty elastického modulu patologických měkkých tkání bývají obvykle v rozsahu mezi 0,2 - 5.6 MPa.

Tab. 15 *Elasticita biologických tkání (Kneubuehl et al., 2011; Nicolle et al., 2012, Umale et al., 2013)*

BIOLOGICKÁ TKÁŇ	MORFOLOGIE	YOUNGŮV MODUL [MPa]
Prsní tkáň	Tuk bez patologický změn	0.18 - 0.24
	žláza bez patologie	0.28 - 0.66
	fibrózní tkáň	0.96 - 2.4
	karcinom	0.22 - 5.6
Prostata	fyzilogický anterior	0.55 - 0.63
	fyzilogický posterior	0.62 - 0.71
	BHP	0.36 - 0.41
	karcinom	0.96 - 2.41
Játra	bez patologický změn	0.28 - 0.37
	cirhóza	1.5 - 10
Tepny	fyzilogické	7 - 30
Chrupavka	Bez poškození	50
Šlachy		8
Bránice		3
Kůže na bříše		21 - 35
Spongióza kosti		50
Kompakta kosti		14 000
Střevo		0.5
Svaly	(relaxovaný - kontrahovaný)	1 - 10
Ledvina	Bez patologického nálezu	0.4 - 0.52
Slezina	Bez patologického nálezu	0.31 - 0.65

Změny elastický vlastností tkání se nejlépe určují srovnáním s průměrnou hodnotou elasticity ve zvolené referenční oblasti. Zavádí se veličina "*strain ratio*", která definuje jako podíl elasticity v referenční oblasti a elasticity v měřené oblasti. Strain ratio vyjadřuje kolikrát je struktura v měřené oblasti tužší než v tkáň v referenční oblasti (Ophir et al., 2002)

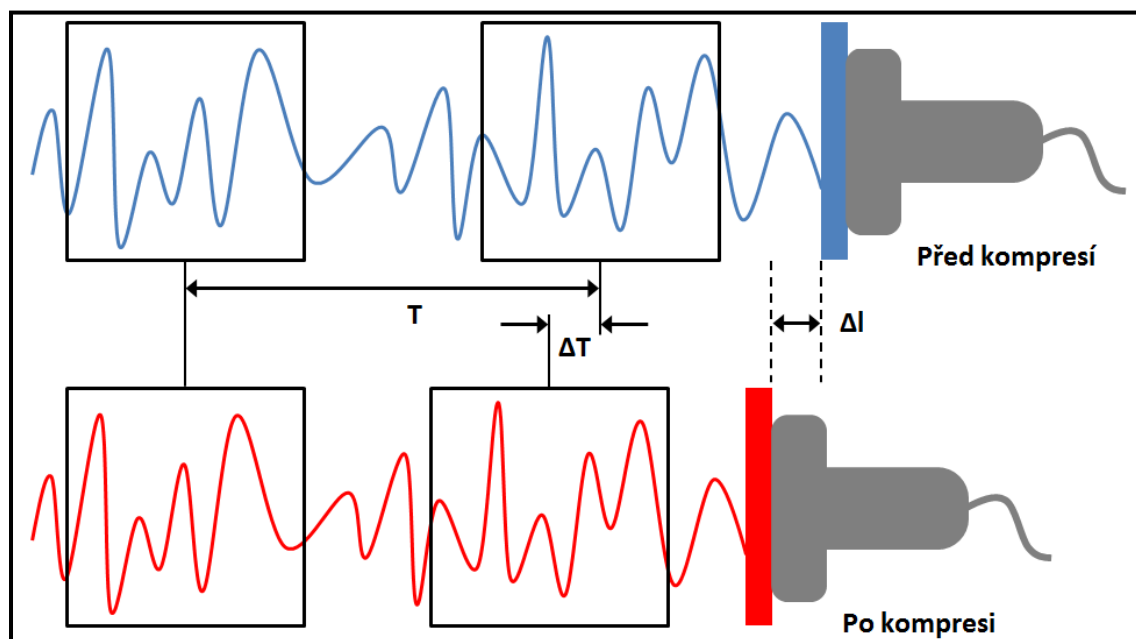
12.6.2 Ultrazvuková elastografie

K zobrazení elastických vlastností tkání se používají ultrazvukové vlny, podobně jako u diagnostického ultrazvuku. Výstupem ultrazvukové elastografie je ultrazvukový B - obraz překrytý barevnou mapou, kdy je v každém bodu tkáně (pixelu) v zájmové oblasti přiřazena určitá barva, která kóduje elastické vlastnosti příslušného bodu zobrazované tkáně. Měkké tkáně bývají obvykle kódovány teplými odstíny (červená, žlutá), tuhé tkáně pak studenými barvami (modrá, fialová). (Ophir et al., 2002)

Ultrazvukové elastografické metody rozlišujeme statické (*kompresní*) nebo dynamické (*shear waves*).

12.6.2.1 Statická ultrazvuková elastografie

Elastické vlastnosti tkání se u této metody určují na základě rozdílů UZ signálu před a po kompresi tkáně. Stlačení tkáně se nejčastěji provádí přímo měřicí UZ sondou nebo pomocí vhodného externího zařízení. Z nasmlínaných dvojic obrazů tkáně před a po kompresi se vhodnými korelačními algoritmy pro každý bod (*pixel*) zájmové oblasti (*ROI - region of interest*) obrazu stanovuje míra deformace tkáňových struktur.

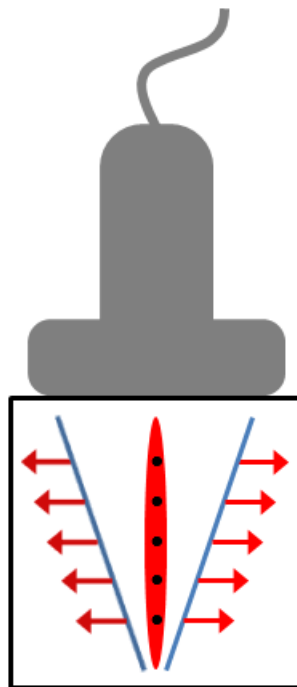


Obr. 78 Posun tkáně se vyhodnocuje jako časový rozdíl UZ signálů (paprsky A-módu) odražených v různých hloubkách tkáně (měřící okna) před a po stlačení. Časové posunutí měřících oken před a po kompresi ΔT se obvykle vztahuje k časové vzdálenosti měřících oken T před kompresí (Sedlář et al., 2013)

V praxi se obvykle vyše jeden zobrazovací pulz pro stanovení pozice tkáně před stlačením, intenzivní pulz způsobující kompresi tkáně a jeden nebo více zobrazovacích pulzů, které stanovují pozici tkáně po kompresi a monitorují návrat tkáně zpět do původní polohy (Sedlář et al., 2013).

12.6.2.2 Dynamická ultrazvuková elastografie

Dynamická elastografie je metoda založená na střížných silách (shear waves). Tyto vlny vznikají jako odezva elastického odporu tkáně na mechanické vibrace s nízkou frekvencí (asi 50-100 Hz) a šíří se celým objemem tkáně v příčném směru (částice tkáně kmitají kolmo na směr šíření ultrazvuku), podobně jako vlny na vodní hladině.



Obr. 79 *Vznik střížných vln (shear waves) v různých hloubkách tkáně s využitím fokusace UZ paprsku do více fokusačních zón (Sedlář et al., 2013)*

UZ vlny se šíří prostředím v podélném směru. Částice látky kmitají ve směru šíření vlny, přičemž dochází k zahuštění a zředování částic prostředí ve směru šíření. Rychlost šíření **podélných vln** c_l je ovlivněna elastickými vlastnostmi (**objemový modul pružnosti K**) a **hustotou prostředí ρ** . Podélné vlny se mohou šířit libovolným hmotným prostředím. V biologických měkkých tkáních se rychlost šíření podélných vln asi 1400 - 1600 m/s.

$$Cl = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}$$

Střížné vlny se mohou šířit pouze prostředím, které odolává namáhání ve smyku, tj. pouze v prostředí pevném. Rychlost šíření střížných vln v_s ve tkáních je oproti rychlosti šíření vln velmi nízká (cca 1-10 m/s) a závisí na smykových elastických vlastnostech ($G = E/3$) a hustotě ρ prostředí.

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$$

Elasticita tkání (**Youngův modul E**) lze odhadnout z rovnice (výše) na základě naměřené **rychlosti šíření střížných vln (v_s)** ve tkáních. **Hustotu biologických tkání (ρ)** obvykle dosazujeme jako konstantu (viz *tabulka níže*). Průměrná hustota měkkých tkání (prsni tkáň, prostata, játra, ledviny) je přibližně $1047 \pm 5 \text{ Kg/m}^3$ (Sedlář et al., 2013).

Tab. 16 Hustota biologických tkání (Sedlář et al., 2013)

BIOLOGICKÁ TKÁŇ	HUSTOTA [kg/m ³]
Tuk	928 ± 9
Kosterní svalstvo	1041 ± 20
Játra	1060 ± 10
Ledviny	1050
Slinivka	1040 ± 10
Prostata	1045
Štítná žláza	1050 ± 14
Varlata	1040
Vaječníky	1048
Šlacha	1165
Měkké tkáně	1047 ± 5

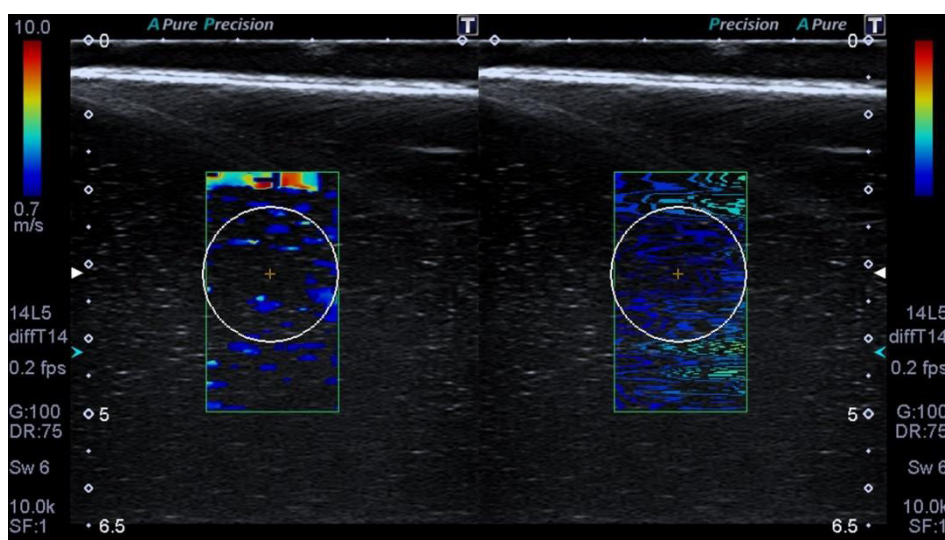
Rychlost šíření vlny se určuje korelačními algoritmy jako výsledek míry posunu každého bodu (*pixelu*) tkáně v čase. Jednoznačnou výhodou shear waves elastografie je přímo kvantitativní popis elastických vlastností tkáně, protože jsou známé všechny parametry nutné pro výpočet (*rovnice výše*) - rychlost šíření střížných vln a hustota tkáně (Hoskins et al., 2010).

12.7 Vlastní experimentální data

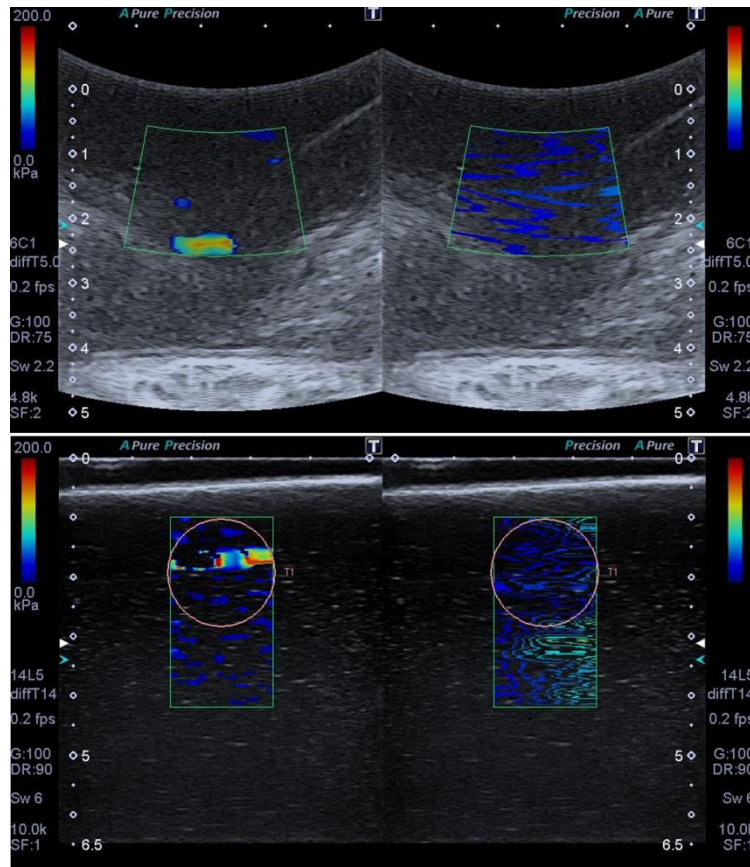
Experiment proběhl za spolupráce radiologického oddělení FN Motol Praha. Moderní experimentální metody používané v ranivé balistice jsou založeny na využití zkušebních "terčů" vyrobených z plastických resp. pružně plastických náhradních materiálů (Juříček, 2017). Materiál dále musí vykazovat téměř stejnou 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 (více v kapitole 13).

Hodnoty vypočteny v (kapitola 13 tab. 4.1) jsme schopni vypočítat elasticitu a viskozitu tělesa. Níže přikládám experimentální data z vlastního měření.



Obr. 80 Ultrazvuková elastografie - 10 % balistická želatina. Rychlost šíření zvukové vlny v náhradním materiálu při kompresi [experimentální data]



Obr. 81 Ultrazvuková elastografie - 10 % balistická želatina. Velikost odporu náhradního materiálu při kompresi vzorku sondou [experimentální data]

Výše uvedená experimentální data ukazují na tzv. ultrazvukový B-obraz s barevnou mapou. Kdy je v každém bodu tkáně (pixelu) v zájmové oblasti přiřazena určitá barva, která kóduje elastické vlastnosti příslušného bodu zobrazované tkáně. Vzhledem k použití UZ sondy pro běžné medicínské vyšetření, docházel při kompresi k materiálu k mnoha artefaktům, které nedovolily signifikantní verifikaci výsledků. Je tedy nutné k experimentálnímu získání dat využít jiné průmyslové UZ zařízení, které bude schopno data lépe verifikovat. Proto bude užito fyzikálních a mechanických charakteristik z literárních zdrojů Sellier & Kneubüehl (2001); Kneubüehl (2011); Juříček (2017) či experimentů Juříček (2013) provedených pomocí pádového zařízení NM v laboratoři K 202 Vojenská akademie, Brno.

13 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

14 PARAMETRIZACE VZNIKLÉ KAVERNY V NÁHRADNÍCH MATERIÁLECH PŘI POUŽITÍ EXPERIMENTÁLNÍ MUNICE

14.1 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. 15 a 16*). Výchozí hodnoty pro matematické modelování se potom získávají experimentálním postřelováním fyzikálního modelu zkoumanými střelami.

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

S ohledem na rozsah plánovaných střeleckých zkoušek a jejich materiální a personální náročnost, bylo nutné ke splnění stanovených cílů využít odborné zázemí specializovaného pracoviště firmy **Prototypa - ZM s.r.o. Brno**.

Předmětem zkoumání ranivé balistiky je vzájemná **interakce malorážové střely a biologického cíle**. Zatímco střela je svým tvarem, geometrickými rozměry a hmotností jednoznačně definována, lidské tělo je ve svém celku nehomogenním objektem tvořeným prostředím (kůže, podkožní vazivo, svalová tkáň, vnitřní orgány a kosti) o různých fyzikálních, mechanických a biologických charakteristikách (hustota, viskozita, stlačitelnost, tvrdost, pevnost, elasticita, plasticita, schopnost pohlcovat energii atd.). Je proto nutné jednotlivé části a orgány biologického systému člověka izolovat a v prvním přiblížení hodnotit jejich odolnost proti dynamickému působení střely odděleně. I takto chápané izolované orgány nevykazují ve všech zkušebních vzorcích stejné vlastnosti. Nemají např. stejnou hustotu, napjatost povrchových vrstev i vnitřních struktur tkáně, liší se také obsahem vody, vzduchu, ale také svým stářím (Juříček, 2017).

Ve snaze přispět k objasnění některých typických jevů (velikost dočasné a permanentní dutiny) při průniku střel tohoto typu měkkými částmi živých tkání jsme provedli balistické experimenty, založené na postřelování bloků simulujících živou tkáň.

Náhradní materiály z hlediska simulace a hodnocení ranivého účinku malorážových střel na živou sílu (biologickou tkáň) musí vyhovovat těmto požadavkům:

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

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

Konečné hodnocení účinků jednotlivých typů střel je dáno jejich působením na člověka, ke kterému dochází za určitých konkrétních podmínek. Neocenitelné jsou v této souvislosti zkušenosti a názory vojenských chirurgů, týkající se střelných poranění, ke kterým dochází v průběhu lokálních válečných konfliktů, ale také civilních lékařů, kteří dnes ošetřují tento typ poranění způsobených nehodami při lovu nebo v důsledku násilné trestné činnosti páchané na civilním obyvatelstvu. Jsou to však jednotlivé případy, ve kterých podmínky vzniku těchto poranění nemohou být předem připraveny, jejich průběh ovlivněn a často zde chybí možnost podílet se na jejich odborném vyhodnocení. Přitom analyzovat důsledky střelného poranění není možné okamžitě po jeho vzniku, ale často s určitým časovým odstupem, kdy se projevy střelného poranění změnilo a došlo rovněž k výrazné změně fyzikálních, mechanických a biologických charakteristik zasažených tkání (Juříček, 2000).

Pro simulaci účinků střel na živou tkáň jsou podle Jurkáška (1984) a Leeming (1998) používány tyto **náhradní materiály** (balistická želatina, glycerínové mýdlo). K experimentálnímu postřelování jsme užili 10 % želatinový blok temperovaný na teplotu 4 °C (Fackler & Malinowski, 1985; Nicholas & Welsch, 2004). Pro experimenty v ranivé balistice jsou používána také glycerínová mýdla (litá transparentní mýdla).

Tuhost, elasticita a průhlednost želatiny umožňuje stanovení její dynamické odolnosti k rázu. K tomuto účelu je vhodné použití **vysokorychlostní kamery** pro snímání změn v želatinovém bloku během průniku střely.

Glycerínové mýdlo (GM) reálně simuluje odstranění (vytlačení) tkáně z jádra střelného kanálu. Plastická tvárnost těchto materiálů způsobuje, že po průchodu střely blokem zůstane trvalá dutina ve svém maximálním objemu (Cronin, 2010). Objem této dutiny kvantitativně představuje množství ovlivněné biologické tkáně, které se dá technicky velmi jednoduše měřit (vylitím dutiny vodou). Svým tvarem a objemem dutina představuje pravděpodobné přemístění částec náhradního materiálu podél

střelného kanálu a je možné ji geometricky transformovat na profil střelného poranění, který lze od zkoumané střely očekávat v biologické tkáni.

V mnohých dřívějších studiích (Fackler & Malinowski 1985; Sellier & Kneubühl 2001; Jussila 2004) se vzorky dále zpracovávají rozřezáváním pomocí ocelové struny, aby bylo možné parametrizovat i vnitřní plochy náhradních materiálů. V našem experimentu vyhodnotíme tyto parametry pomocí moderních **diagnostických metod**, jako je počítačová tomografie (CT). Bloky musely být zabezpečeny pro transport v chladicích boxech.

Rozměr a tvar vstřelu (kruhovitost nebo oválnost) jsou prvními důležitými charakteristikami, které je možné vyhodnotit vizuálně s dostatečnou přesností. Především tvar vstřelu vypovídá mnohé o poloze střely v okamžiku jejího dopadu na čelní plochu vzorku a parametrech střelného kanálu, které lze od takové střely očekávat (Rowe 2000; Kneubühl et al., 2008; Juříček 2013).

V našem experimentu jsme parametrizovali tato data (velikost, průměr, tvar vstupního a výstupního otvoru) jednak pomocí přímého měření ihned po výstřelu (pomocí měřítka), ale následně také po transportu za pomoci moderních diagnostických zařízení (CT). Dostáváme tak 3D informaci o situaci, 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 (*více v kapitole 12.3*).

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

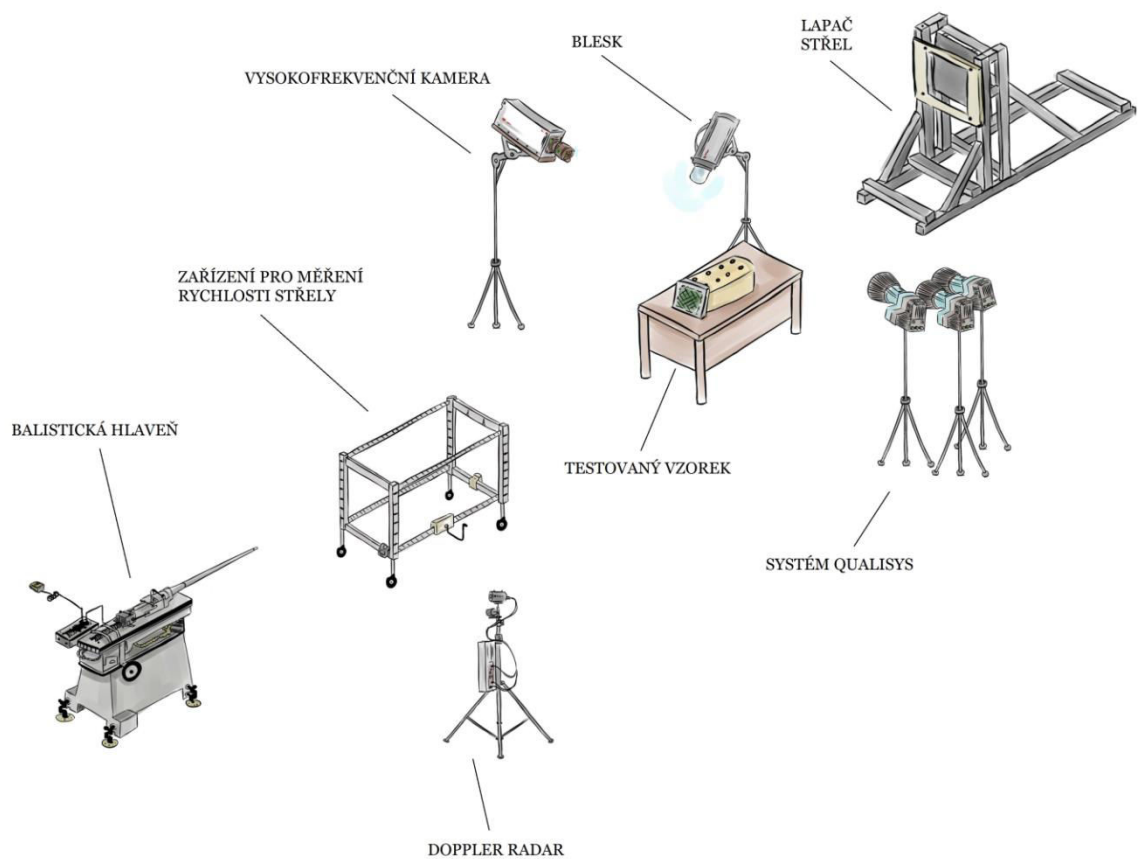
14.3 Balistická charakteristika experimentu

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. 81*). Náboje byly vystřelovány na připravené bloky náhradní tkáně ze zkušebních balistických hlavně (*kapitola 12.2*) 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 materiálem, 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.



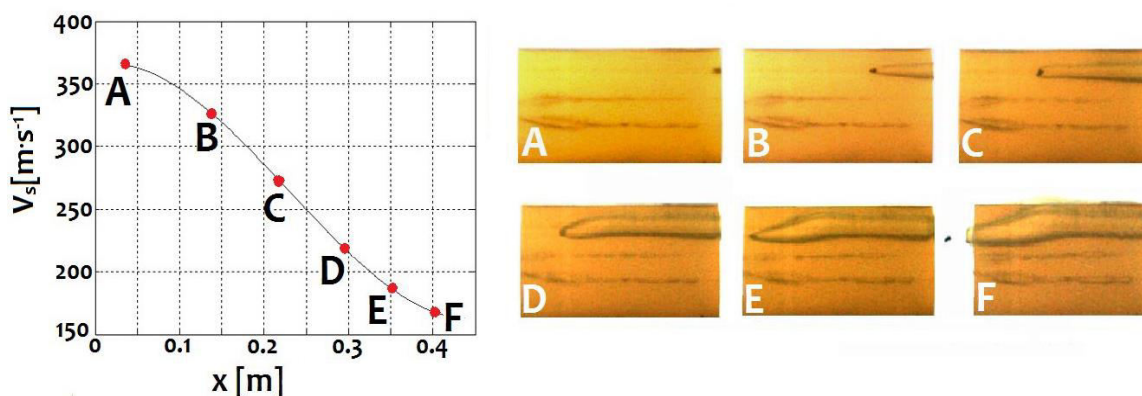
Obr. 82 Schematické rozvržení experimentu [experimentální data]

14.4 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. 82, 83 a 84* 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.

14.4.1 Náboj LUGER 9mm - FMJ

Na (obrázku č. 82) v jeho pravé polovině, vidíme záznam sekvence z vysokofrekvenční kamery *HG 100 RED LAKE*, který zobrazuje průnik střely uměle vyrobeným 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. Za povšimnutí stojí i jeden mimoosý průstřel, který byl proveden jako kontrolní pro nepřímé potvrzení výše uvedeného předpokladu. Potvrzení lze spatřit v deformaci želatiny a dráhy střely (bod *F*), které zjevně byly způsobené rozdílnou distribucí energie do masy materiálu kolem průstřelu. Na snímcích můžeme vidět i dva předešlé záznamy. 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. 83 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 uměle vyrobeným materiálem [experimentální data]

Odpor prostředí proti pohybu střely při jejím pronikání rovněž způsobuje tvarové změny na střele samotné. Stupeň deformace nebo dokonce rozpad těla střely na fragmenty má v konečném důsledku vliv na stabilitu střely při jejím proniku materiálem (Salisbury & Cronin, 2008; See et al., 2009; Juricek, 2013).

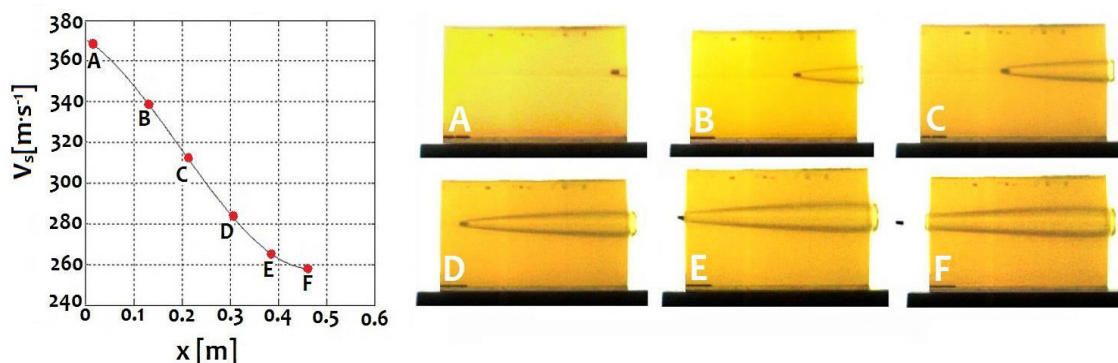
Střela v průběhu svého průniku náhradním materiálem předala **75 % své kinetické energie**. Tato hodnota vypovídá do určité míry o ranivém účinku střely a charakteru poranění živého organismu. Náboj s celoplášťovou pistolovou strelou s parabolicky zaoblenou přední částí a olověným jádrem proniká blokem 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.

14.4.2 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. 83*). Tento náboj je hodnocen velice pozitivně z hlediska nejefektivnějšího účinku na cíl (Bresson et al., 2012).



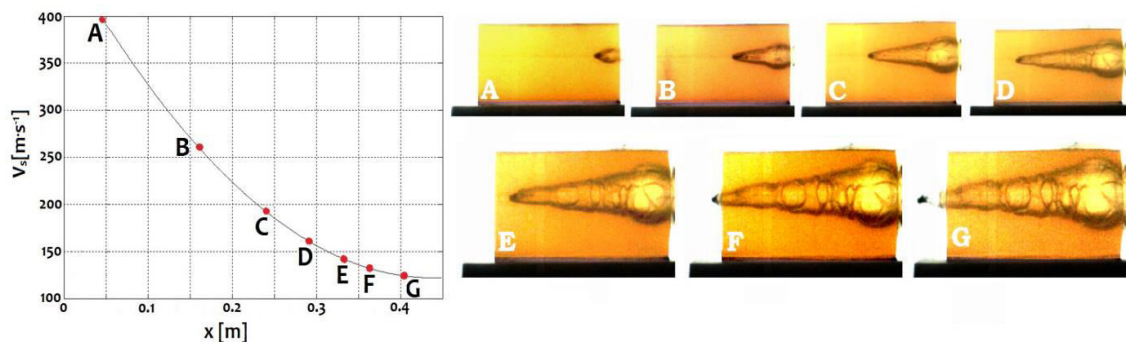
Obr. 84 Střela .357 Magnum 9mm - dynamika tvaru vstřelného kanálu v balistické želatíně A-F (pravá polovina obrázku). V levé polovině obrázku je znázorněn průběh rychlosti v závislosti na průniku střely uměle vytvořeným materiálem [experimentální data]

14.4.3 Náboj MAGNUM .357 – GOLD DOT

Na (*obrázku č. 84*) vidíme revolverové střelivo ráže .357 Magnum GOLD-DOT s expanzivní střelou 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 střelou a s kuželovou přední částí a plochou špičkou, ve které je dutina kuželového tvaru. Jádro je olověné. 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. 18).



Obr. 85 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 artificiálním materiálem [experimentální data]

Výstupní hodnoty jednotlivých experimentálních fází byly uspořádány do výsledných tabulek. Tabulky č. 17 a 18 jsou uspořádány tak, aby parametrizovali použité zbraňové systémy a dokázali přehlednější formou charakterizovat dílčí výsledky.

Tab. 17 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
∅ vletového otvoru (na místě)	mm	15	28	32
∅ vletového otvoru (CT)	mm	16.9	27.2	79.1
∅ výletového otvoru (na místě)	mm	18	27	74
∅ 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 ∅ dutiny (CT)	mm	32.4	27.9	81.7

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

Tabulka č. 18 uvádí jednotlivé parametry experimentální munice v náhradním materiálu (balistická želatina). Výhodou tohoto materiálu je průhlednost a bezbarvosť, 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. 18 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
∅ - maximální vstupní (vysokorychlostní kamera)	mm	34	45	99
∅ - maximální výstupní (vysokorychlostní kamera)	mm	32	21	33
Maximální ∅ 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. 19 uvádí porovnání mezinárodně uznávaných kritérií podle Kneubüehl (2011) a námi zavedených experimentálních kritérií - kapitola 10.3. Vedle jednotlivých parametrů, zdůrazňujeme zde i predikci zranění experimentálně zkoumanými zbraňovými systémy - od I (nejméně) do III (nejvíce).

Tab. 19. Porovnána 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.	<i>J. S.Hatcher (1927)</i>
RSP	27.5	I.	38.1	II.	44.3	III.	<i>J. S.Hatcher (1935)</i>
W_H	12.9	I.	18.2	III.	15.7	II.	<i>W. Weigel (1975)</i>
W_{TH}	8.4	I.	8.8	II.	9.8	III.	<i>K. Sellier (1979)</i>
PIR	94.1	I.	134.9	II.	159	III.	<i>E. A.Matunas (1984)</i>
KO	7.01	I.	9.76	III.	8.17	II.	<i>J.Taylor (1948)</i>
OSS	79	I.	96	III.	89	II.	<i>E. Marshall & E. Sandow (1992)</i>
WP	8.4	I.	12.2	III.	10.8	II.	<i>R. Billich et al. (2016)</i>
WE₁	50.4	II.	47.2	I.	73.9	III.	
WE₂	13.9	I.	19.3	II.	60.6	III.	
PA₁	23.1	II.	49.7	III.	11.1	I.	
PA₂	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

14.5 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 rovinu. 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 pronikání 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.

14.6 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 umělého materiálu 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.

15 Měření mechanických charakteristik polymerních vláken

15.1 Úvodem

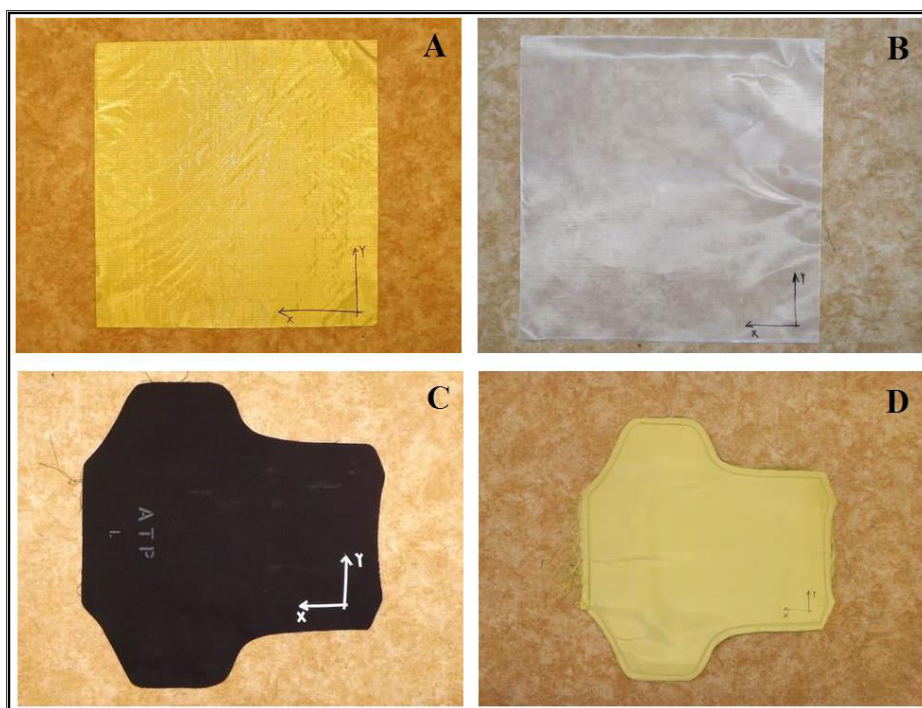
Vlastní experiment probíhal v Novém Technologickém výzkumném centru - Západočeské Univerzity v Plzni (NTVC - ZČUP).

15.2 Popis přípravy zkušebních těles a metodika měření

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. 84).

Pruhy tkaniny/folie (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. nezbývaly 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 trhačího 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 (*více v kapitole 11.9.*). Metodika měření odpovídala standardní destruktivní zkoušce v tahu dle *DIN EN 527-3*.



Obr. 86 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)

15.3 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. Zkušební tělesa byla opakovaně přeměřena posuvným a mikrometrickým měřítkem pro stanovení přesných rozměrů tělesa. 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 (*tabulka č. 20, graf č.1*). Řada zkoušek měla nestandardní průběh a vývoj 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. Ze zkoušky bylo patrné, že v počátcích zatěžování docházelo k prokluzu vnitřních svazků a k primárnímu zatěžování vnějších svazků. Výsledky zatěžování jsou uvedeny v *tabulce č. 20*

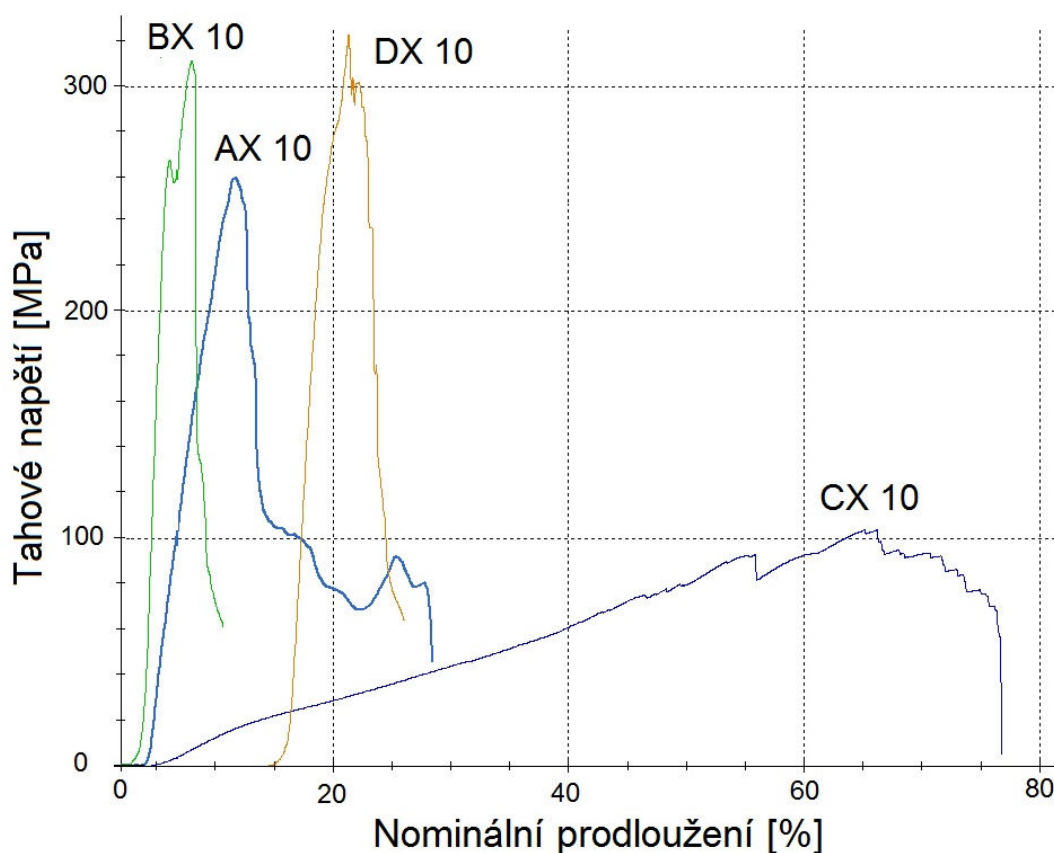
Na základě grafického záznamu software zkušebního stroje vyhodnotil všechna měření, nicméně tyto výsledky nabývaly extrémních nebo i záporných hodnot (např. v prodloužení) a proto byly z tabulky vyřazeny.

Tab. 20 Hodnoty výsledných mechanických charakteristik experimentálních materiálu [experimentální data]

Zkušební vzorek- Směr- Šířka	L_c mm	E MPa	R_m MPa	F_m N	A_t (corr.) %	A_{50} %	L_0 mm	L_c mm	a_0 mm	b_0 mm	S_0 mm ²
AX 10	70	-	93,8	230,75	-	-	70	70	0,246	10	2,46
AX 10	100	1428	209,65	660,4	17,9	14,2	100	100	0,300	10,5	3,15
AX 10	90	-	259,97	623,93	-	-	90	90	0,24	10	2,40
AX 15	70	-	248,07	595,36	22,2	-	70	70	0,240	10	2,40
AY 10	70	366	85,37	231,3	48,1	43,4	70	70	0,271	10	2,71
AY 10	100	1332	205,99	640,5	25,3	17,9	100	100	0,26	10	2,60
AY 15	70	-	158,18	433,42	19,5	-	70	70	0,274	10	2,74
BX 5	100	4529	164,7	170,54	8,5	7,7	100	100	0,19	5,45	1,04
BX 10	100	2746	174,14	330,86	18,7	17,2	100	100	0,19	10	1,90
BX 10	100	2763	263,19	428,35	41,4	39,5	100	100	0,15	10,5	1,63
BX 15	100	-	284,18	704,88	51,4	-	100	100	0,16	15,5	2,48
BX 5	70	-	157,19	133,61	35,4	-	70	70	0,166	5	0,83
BX 10	70	-	194,97	331,45	22,6	-	70	70	0,17	10	1,7
BX 15	70	2487	224,38	558,72	19,3	17,5	70	70	0,166	15	2,49
BX 10	90	93	311,37	482,63	9,9	-	90	90	0,155	10	1,55
BY 5	70	5139	235,00	199,75	15,3	14,4	70	70	0,17	5	0,85
BY 10	70	-	262,10	445,57	39,4	-	70	70	0,17	10	1,70
BY 15	70	-	494,67	1261,4	47,6	-	70	70	0,17	15	2,55
CX 15	70	-	90,36	2304,4	141,1	-	70	70	1,7	15	25,5
CX 10	90	-	103,79	1608,8	73,9	-	90	90	1,55	10	15,5
CX 5	90	-	99,39	449,6	29,5	-	90	90	1,60	5	8
CY 10	100	85	99,48	1641,4	46,6	-	100	100	1,65	10	16,50
CY 15	100	227	94,88	2348,2	41,7	-	100	100	1,65	15	24,75
CY 5	100	-	89,19	547,56	33,65	31,3	100	100	1,75	5	8,75
DX 10	100	4311	157,12	392,81	7,7	5,8	100	100	0,25	10	2,50
DX 15	100	3675	158,61	594,81	7,1	5,2	100	100	0,25	15	3,75
DX 10	90	-	322,91	839,57	-	-	90	90	0,26	10	2,6
DY 5	100	1034	299,14	299,14	10	4,2	100	100	0,2	5	1
DY 10	100	-	340,96	852,42	11,0	10,8	100	100	0,25	10	2,50
DY 15	100	-	331,29	1242,3	13,4	7,5	100	100	0,25	15	3,75

Legenda: AX,Y 10, 15 - zkušební těleso - vrstva balistické ochrany para-aramidová vlákna (KEVLAR) o šířce 10 a 15 mm s orientací ve směru X a Y. BX,Y - 5, 10, 15 - zkušební těleso - vrstva balistické ochrany vysokomolekulární polyetylen (UHMWPE) o šířce 5, 10 a 15 mm s orientací ve směru X a Y. CX,Y - 5, 10, 15 - zkušební těleso - nylonové - polyamidové vlákno (antitraumatická vložka) o šířce 5, 10 a 15 mm s orientací ve směru X a Y. DX,Y - 5, 10, 15 zkušební těleso vrstva balistické ochrany para-aramidová vlákna - (KEVLAR - Strike Face) o šířce 10 a 15 mm s orientací ve směru X a Y. L_c - pracovní vzdálenost, E - modul pružnosti v tahu, R_m - mez pevnosti v tahu, F_m - síla na mezi pevnosti v tahu, A_t (corr.) - prodloužení zkušebního tělesa po korekci - tažnost, A_{50} - poměrné prodloužení v procentech počáteční délky - tažnost, L_0 - počáteční délka zkušebního tělesa (pracovní vzdálenost), a_0 - tloušťka zkušebního tělesa, b_0 - Šířka zkušebního tělesa, S_0 - Průřez zkušebního tělesa

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, což je patrné z tabulky č. 20

15.4 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. Obrazová dokumentace je uvedena v *kapitole č. 11.3*.

15.5 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. 21*.

Tab. 21 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 maticí 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.

16 Teorie rázu ve viskoelastickém kontinuu

16.1 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>.

16.1.1 Materiálové vztahy

Předpokládejme, že půjde o homogenní, izotropní, termo-viskoelastický materiál, jehož obecný konstitutivní vztah je

$$t^{ij} = -3K\alpha(T - T_o)\delta^{ij} + Ke_{(1)}\delta^{ij} + 2\hat{\mu}e^{(o)ij} + 2\mu d^{(o)ij} \quad (1.1)$$

Materiálové parametry mohou obecně záviset i na velikosti deformace a mají následující fyzikální význam:

Tab. 22 Materiálové parametry náhradního materiálu tkáně Ž-10
[experimentální data]

$K \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] = 2.38 \cdot 10^9$	modul stlačitelnosti
$\hat{\mu} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] = 0.895 \cdot 10^9$	modul pružnosti ve smyku
$E \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] = 2.39 \cdot 10^9$	Youngův modul pružnosti
$\mu \text{ [Pa} \cdot \text{s]} = 40$	koeficient smykové viskozity
$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] = 0.04$	koeficient kinematické viskozity
$\alpha \text{ [K}^{-1}\text{]}$	koeficient teplotní roztažnosti

Uvedeme definice těchto veličin a jejich velikost pro **10% želatinový roztok** označený Z-10, který byl použit při fyzikálních experimentech. Jeho hustota při teplotě 20°C je $\rho = 1030 [\text{kg m}^{-3}]$ a jeho objemová stlačitelnost je

$$\frac{1}{K} = \rho_0 \left(\frac{\partial(1/\rho)}{\partial p} \right)_T = 4.2 \cdot 10^{-10} [\text{Pa}^{-1}] \quad (1.2)$$

Budeme nadále pro jednoduchost předpokládat, že materiál Z-10 je Hookovský a dokonale viskoelastický. Tento předpoklad byl potvrzen rázovým testem, který byl realizován pádem tělesa z materiálu Z-10 ve tvaru pravidelného kvádrů z výšky 3 m na pevnou podložku. Po dopadu se krychle zcela zdeformovala a po odrazu se opět přetvořila v původní kvádr (*experiment proveden v laboratoři biomechaniky extrémní zátěže FTVS UK, Praha*).

Pro tento typ materiálu platí vztahy [2], [1]

$$\hat{\mu} = \frac{3K(1-2\sigma)}{2(1+\sigma)} = \frac{E}{2(1+\sigma)}, \quad E = 3K(1-2\sigma) \quad (1.3)$$

kde σ je Poissonovo číslo (1.11). Hodnotu σ můžeme stanovit ze známé rychlosti podélných vln (zvuku), která pro tento typ materiálu je

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{3K(1-2\sigma)}{\rho}} = 1520 \text{ m s}^{-1} \quad (1.4)$$

a úpravou nalezneme

$$\sigma = 0.5 - \frac{\rho c^2}{6K} = 0.333 \quad (1.5)$$

Podle vztahů (1.3) můžeme stanovit modul pružnosti ve smyku $\hat{\mu} = 0.895 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ a Youngův modul pružnosti $E = 2.39 \cdot 10^9 \text{ Pa}$.

16.1.2 Tenzor konečných deformací

Eulerův tenzor konečných deformací $e^{ij}(x^l, t)$ v souřadnicích spojených s deformovaným tělesem, viz Obr. 1.2 je vyjádřen pomocí vektoru posunutí

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = (u^1(x^i, t), u^2(x^i, t), u^3(x^i, t)) = (u_x, u_y, u_z) \quad (1.6)$$

z bodu \mathbf{X} do bodu \mathbf{x} , viz *obrázek č. 87*. Jeho obecný tvar je

$$e^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u^l}{\partial x^i} \frac{\partial u^l}{\partial x^j} \right) \quad (1.7)$$

Stopa tenzoru deformace $e_{(1)}$ vyjadřuje změnu velikosti objemu při deformaci a deviator

^(o)
 e^{ij} tohoto tenzoru vyjadřuje přetvoření.

Tedy

$$e_{(1)} = \delta_{ij} e^{ij} = e^{11} + e^{22} + e^{33} = \sum_{m=1}^3 \left[\frac{\partial u^m}{\partial x^m} - \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u^l}{\partial x^m} \frac{\partial u_l}{\partial x^m} \right] \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} e^{ij} &= e^{ij} - \frac{1}{3} e_{(1)} \delta^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u^l}{\partial x^i} \frac{\partial u_l}{\partial x^j} \right) - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 \left[\frac{\partial u^m}{\partial x^m} - \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u^l}{\partial x^m} \frac{\partial u_l}{\partial x^m} \right] \delta^{ij} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} - \frac{2}{3} \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u^l}{\partial x^l} \delta^{ij} \right) - \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u^l}{\partial x^i} \frac{\partial u_l}{\partial x^j} + \frac{1}{6} \sum_{l,m=1}^3 \left(\frac{\partial u^l}{\partial x^m} \right)^2 \delta^{ij} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Uvedeme tvar tenzoru deformace pro **jednoosé zatěžování tyče** ve směru osy x za předpokladu, že v kolmých směrech y, z není těleso zatěžováno, tj. nenulová je pouze složka $t_{xx} \neq 0$. Tento předpoklad platí, jen když je tenzor napětí popisován v aktuální konfiguraci (soustava souřadnic spojená s deformovaným tělesem), viz *obrázek č. 88*. Z tohoto důvodu používáme Eulerův tenzor deformace (1.7), kde je posunutí materiálových bodů popisováno v aktuální soustavě souřadnic $(x^i, t) = (x, y, z, t)$.

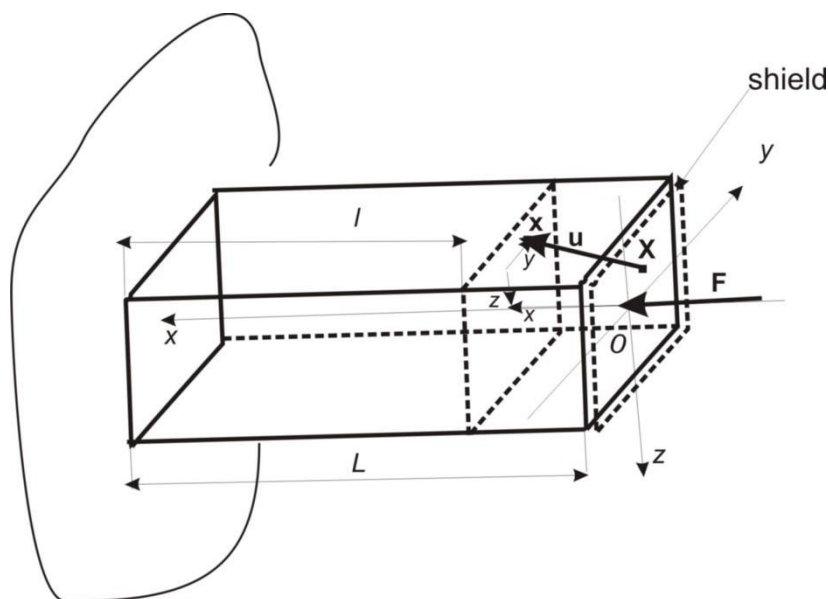
S ohledem na použitý tvar konstitučního vztahu (1.1) můžeme smykové deformace ve směru y, z považovat za nulové, tedy $\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial x} = \frac{\partial u_z}{\partial y} = 0$. Vzhledem ke konečným příčným rozměrům

tyče, viz. *obrázek č. 88* budeme uvažovat i příčnou deformaci, tj., $\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \neq 0$. Tudiž pro posunutí

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = (u^1(x, t), u^2(y, t), u^3(z, t)) = (u_x, u_y, u_z) \quad (1.10)$$

má složka tenzoru konečné deformace v podélném směru tvar

$$\begin{aligned} e_{xx} &= \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] \right) \rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} - \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2, \\ &\text{pro } \sigma = -\frac{\frac{\partial u_y}{\partial y}}{\frac{\partial u_x}{\partial x}} = -\frac{\frac{\partial u_z}{\partial z}}{\frac{\partial u_x}{\partial x}} \end{aligned} \quad (1.11)$$



Obr. 87 Síly působící na experimentální náhradní materiál (Ž-10) před deformací
[experimentální data]

Legenda: shield - balistická ochranná pomůcka

Znázornění působení síly $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$ před deformací (v čase $t = 0$). Touto silou můžeme vybudit deformaci

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = (\mathbf{x} - \mathbf{X}) = (u_x(x^i, t), u_y(x^i, t), u_z(x^i, t)).$$

Materiálový bod \mathbf{X} přechází po deformaci do polohy \mathbf{x} . Těleso je chráněno BOP.

Podobně i objemová změna $e_{(1)}$ a deviator $e^{(o)ij}$ mají tvar

$$\begin{aligned} e_{(1)} &= (1 - 2\sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x} - \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2, \\ e_{xx}^{(o)} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} - \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 - \frac{1}{3} \left[(1 - 2\sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x} - \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 \right] \\ &= \frac{2}{3} (1 + \sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \quad (1.12)$$

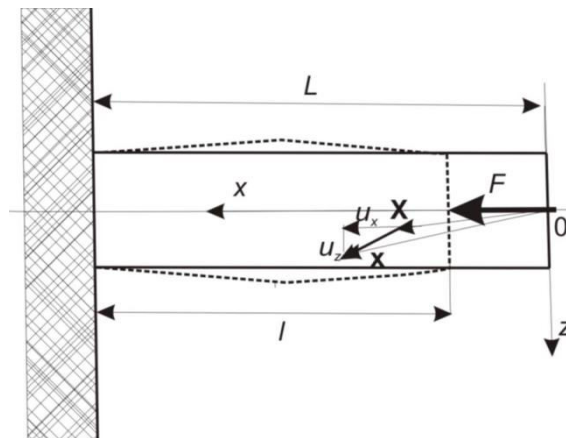
Při uvažování jen elastické části tenzoru napětí (1.1)

$$\begin{aligned}
t_{xx} &= Ke_{(1)}\delta_{xx} + 2\hat{\mu}e_{xx}^{(o)} \\
&= K \left[(1-2\sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x} - \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 \right] + \frac{4}{3} \hat{\mu} \left[(1+\sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x} - \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 \right] \\
&= \left[K(1-2\sigma) + \frac{4}{3} \hat{\mu}(1+\sigma) \right] \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left(\frac{1}{2} + \sigma^2 \right) \left(\frac{4}{3} \hat{\mu} - K \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 \\
&= E \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{(1+2\sigma^2)(1-5\sigma)E}{6(1+\sigma)(1-2\sigma)} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2
\end{aligned} \tag{1.13}$$

Při úpravě jsme použili vztahů (1.3) platných pro **Hookův materiál**. Vidíme značný **vliv nelineárního členu**, zvláště pro $\sigma \rightarrow 0.5$. Chceme-li příčnou deformaci zanedbat $\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$, potom je třeba ve vztahu (1.13) položit $\sigma = 0$. Výsledkem je **tenzor napětí konečných deformací** pro podélnou deformaci nekonečné roviny

$$t_{xx} = \left(K + \frac{4}{3} \hat{\mu} \right) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left(\frac{4}{3} \hat{\mu} - K \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 \tag{1.14}$$

V dalším budeme však předpokládat existenci příčné deformace, tj. $\sigma \neq 0$, viz. *obrázek č. 88*



Obr. 88 1D deformace tyče v aktuální konfiguraci. Bod \mathbf{X} se posune o vektor posunutí $\mathbf{u}(x,t) = (\mathbf{x} - \mathbf{X}) = (u_x(x,t), u_y(x,t), u_z(x,t))$ do polohy \mathbf{x} [experimentální data]

16.1.3 Tenzor rychlosti deformace a tenzor malých deformací

Tenzor rychlosti deformace je definován vztahem

$$d^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right), \quad {}^{(o)}d^{ij} = d^{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial v^l}{\partial x^l} \delta^{ij}. \quad (1.15)$$

Rychlost materiálového bodu $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ vyjádříme v prostorových (Eulerových) souřadnicích $(\mathbf{x}, t) = (x^1, x^2, x^3) \equiv (x, y, z, t)$ jako materiálovou derivaci vektoru posunutí $\mathbf{u}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) - \mathbf{X}$ kde \mathbf{X} je poloha materiálového bodu na začátku deformace v čase $t = 0$ a $\mathbf{x}(\mathbf{X}, t)$ je jeho poloha v čase t , viz *obrázek č. 87* Takže platí

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = \left. \frac{\partial \mathbf{x}(\mathbf{X}, t)}{\partial t} \right|_{\mathbf{x}} = \left. \frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{X}, t)}{\partial t} \right|_{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) \quad \text{kde} \quad \mathbf{X} = \mathbf{X}^{-1}(\mathbf{x}, t) \quad (1.16)$$

$$v_x(x, t) = \frac{\partial u_x(x, t)}{\partial t} \quad \text{jen ve směru deformace}$$

Konvektivní člen $v^l \frac{\partial u^i}{\partial x^l}$ má význam jen ve směru deformace a proto zrychlení materiálu v bodě (\mathbf{x}, t) je rovno

$$\dot{v}_x(x, t) = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \frac{\partial u_x}{\partial t} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} \quad (1.17)$$

V příčném směru rychlosti zanedbáme. Zanedbáním kvadratických členů v tenzorech deformace (1.8) a (1.9) dostáváme obvyklý tenzor malých deformací. Vzhledem k tomu, že budeme nadále užívat jen tenzor konečných deformací, ponecháme stejné označení jako v případě tenzoru malých deformací, tudíž

$$e^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} \right) \quad (1.18)$$

$${}^{(o)}e^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} - \frac{2}{3} e_{(1)} \delta^{ij} \right), \quad e_{(1)} = \frac{\partial u^l}{\partial x^l} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Pro případ podélných vln v tyči, je relevantní pouze komponenta

$$e_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{1}{3} (1 - 2\sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{2}{3} (1 + \sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (1.19)$$

Tenzor rychlosti deformace (1.15) popisuje i případy, kdy dochází k velkým deformacím (např. tečení tekutin). Jen v případě malých deformací platí, že tenzor rychlosti deformace (1.15) je roven materiálové derivaci tenzoru (1.18), tj.

$$d^{ij} = \dot{e}^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j \partial t} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i \partial t} \right) \quad (1.20)$$

16.1.4 Experimentální stanovení deformací

Deformace tyčí se experimentálně stanoví nejčastěji pomocí tzv., **inženýrského** (nebo Cauchyho) **napětí** (engineering or Cauchy strain), které je definováno jako poměr

$$\varepsilon_{eng} = \frac{l-L}{L} \square \frac{\partial u_x(X)}{\partial X} \quad (1.21)$$

t.j., $\mathbf{u}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) - \mathbf{X}$, pak tato deformace odpovídá Lagrangeovu popisu, kdy se pohyb tělesa (materiálového bodu) vztahuje k nedeformovanému stavu.

Pro naše účely konečných deformací budeme používat **tzv. Eulerovo** (někdy Eulerovo - Almaziho) **napětí**, které je definováno tenzorem (1.7)

$$\varepsilon_{Eul} = \frac{1}{2} \left[\frac{l-L}{l} - \left(\frac{l-L}{l} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{l^2 - L^2}{l^2} \right), \quad \text{při } \frac{\partial u_x(x)}{\partial x} \square \frac{l-L}{l} \quad (1.22)$$

kdy se deformace vztahuje k aktuálnímu (zdeformovanému) stavu, viz *obrázek č. 88* tj., $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{x} - \mathbf{X}(\mathbf{x}, t)$. Jednoduchou úpravou nalezneme vztah k obvyklejšímu inženýrskému napětí (1.21)

$$\varepsilon_{Eul} = \frac{1}{2} \left(\frac{l^2 - L^2}{l^2} \right) = \frac{1}{2} \frac{(l+L)(l-L)}{l} \Big|_{|l-L|} \square \frac{l-L}{L} = \varepsilon_{eng} \quad (1.23)$$

16.2 Bilance hybnosti, momentu hybnosti a mechanické energie

Zákon **bilance hybnosti (rovnováha sil)** je vyjádření rovnováhy objemových (setrvačná a gravitační a povrchových sil. Pro celé těleso platí

$$\int_V \rho(\dot{\mathbf{v}} - \mathbf{g}) dv = \int_{\partial V} \mathbf{T}_{(n)} \mathbf{n} da \quad \text{pro } T_{(n)}^i = t^{ki} n_k \quad (1.24)$$

kde $\mathbf{g} = (0, 0, g)$ je gravitační zrychlení působící ve směru souřadnice z , $\mathbf{T}_{(n)} = (F, 0, 0)$ je povrchová síla působící na plochu s normálou $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ a t^{ki} je tenzor napětí.

Pro každý materiálový bod tělesa má bilance (1.24) tvar

$$\rho(\dot{v}^i - g^i) - \frac{\partial t^{ki}}{\partial x^k} = 0, \quad i, k = 1, 2, 3 \text{ pro } \mathbf{x} \in V \quad (1.25)$$

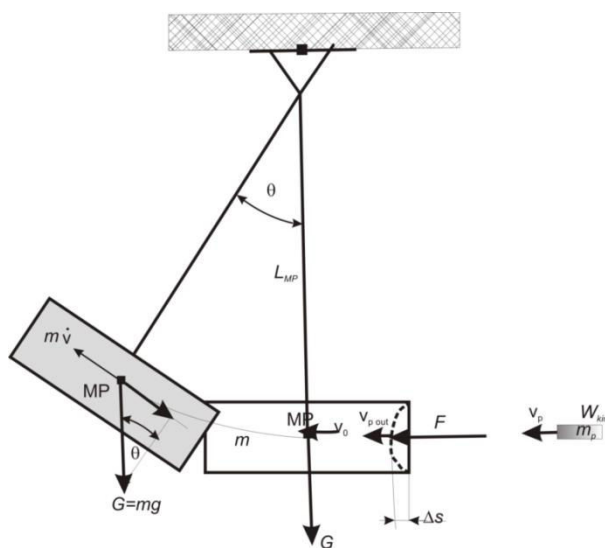
kde tenzor napětí t^{ki} vyjadřuje působení vnějších povrchových sil.

Bilance momentu hybnosti (rovnováha momentů sil) pro těleso jako celek má ve vektorovém zápisu (\times značí vektorový součin) tvar

$$\mathbf{L} \times \int_V \rho(\dot{\mathbf{v}} - \mathbf{g}) dv = \mathbf{L} \times \int_{\partial V} \mathbf{T}_{(n)} \mathbf{n} da \quad (1.26)$$

kde vektorem $\mathbf{L} = (0, 0, L_{MP})$ značíme závěs tělesa o celkové hmotnosti $m = \int_V \rho dv$ a

váze $\mathbf{G} = \int_V \rho \mathbf{g} dv = (0, 0, G)$ v těžišti, viz *obrázek č. 89*



Obr. 89 Vychýlení tělesa po nárazu střely s kinetickou energií W_{kin} [experimentální data]

Ke stanovení velikosti výchylky tělesa zavěšeného na závěsu délky L_{MP} použijeme **bilanci momentů působících sil** (1.26) vzhledem k závěsu. Předpokládáme, že je těleso zavěšeno v těžišti MP (*Mass Point*). V okamžiku dopadu projektilu byl tělesu udělen moment hybnosti $L_{MP}F$. Tento moment byl přeměněn na moment setrvačných sil, který se s časem nemění. Při dalším pohybu je moment hybnosti setrvačných sil kompenzován momentem gravitační síly, tj.,

$$L_{MP}mL_{MP}\ddot{\theta} + L_{MP}mg \sin \theta = 0 \quad (1.27)$$

kde jsme rychlost v , vychýlené hmoty vyjádřili pomocí úhlu vychýlení θ , tj.,

$$v = L_{MP}\dot{\theta} \text{ a zrychlení } \dot{v} = L_{MP}\ddot{\theta} \quad (1.28)$$

Proti setrvačné síle působí síla gravitační $mg \sin \theta$. Jestliže aproximujeme $\sin \theta \approx \theta$ dostáváme z rovnice bilance (1.27) lineární diferenciální rovnici pro úhel vychýlení

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{L_{MP}}\theta \quad (1.29)$$

jejímž řešením jsou harmonické kmity $\theta(t) = \theta_0 \exp(i\omega t)$, pro $i = \sqrt{-1}$. Po dosazení do (1.29) dostáváme

$$\omega^2 = \frac{g}{L_{MP}}, \text{ tudíž } \theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t) \text{ pro } \omega = \frac{2\pi}{\tau} = \sqrt{\frac{g}{L_{MP}}}, \tau = 2\pi \sqrt{\frac{L_{MP}}{g}} \quad (1.30)$$

kde τ je **doba jedné periody kmitu** a nezávisí na hmotnosti tělesa. Amplituda kmitu (maximální výchylka) je θ_0 nastává v čase t_{\max}

$$\frac{\pi}{2} = \omega t_{\max}, \quad t_{\max} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\tau}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{L_{MP}}{g}} \quad (1.31)$$

Velikost výchylky θ_0 závisí na velikosti hybnosti předané v okamžiku dopadu zavěšenému tělesu. Rychlost střely *.357 MAGNUM FMJ (9mm)* v okamžiku dopadu je $v_p = 375 \text{ m/s}$ potom je její hybnost rovna $m_p v_p = 0.0153 \cdot 375 = 5.737 \text{ kg ms}^{-1}$.

Předpokládejme, že **hmotnost zavěšeného tělesa** je $m = 75 \text{ kg}$ a jeho rychlost je těsně před dopadem projektilu nulová. Pak je jeho hybnost $mv_0 = 75 \cdot 0 = 0 \text{ kg ms}^{-1}$. Délku závěsu předpokládejme $L_{MP} = 1 \text{ m}$. Předpokládejme, že je projektil v okamžiku srážky v těsném kontaktu s tělesem a tvoří jeden hmotný celek, který se pohybuje rychlostí v_{MP} (1.37).

Celková hybnost soustavy těleso plus projektil je podle (1.36) rovna

$$mv_0 + m_p v_p = m_p v_p = (m + m_p) v_{TP} = (m + m_p) L_{TP} \theta_0 \omega \cos(\omega t) \Big|_{t=0} = (m + m_p) L_{TP} \theta_0 \omega \quad (1.32)$$

kde rychlost těžiště v okamžiku kontaktu $t = 0$ je $L_{MP} \dot{\theta}(t) = \theta_0 \omega \cos(\omega t = 0)$.

Odtud plyne pro **velikost maximální výchylky**

$$\theta_0 = \frac{m_p v_p}{(m + m_p) \sqrt{L_{MP} g}} = \frac{0.0153 \cdot 375}{(75 + 0.0153) \sqrt{1 \cdot 9.81}} = 0.0244 \text{ rad} = 1.4^\circ \quad (1.33)$$

V okamžiku dopadu dochází k deformaci povrchů těles (tělesa V i projektilu). Tato deformace však neovlivní velikost výchylky (1.33). Velikost deformací je důsledkem **zmaření kinetické energie** střely.

Její velikost můžeme stanovit z **bilance mechanické energie**

$$\rho(\dot{v}^i - g^i) v_i = \frac{\partial t^{ki}}{\partial x^k} v_i = \frac{\partial(t^{ki} v_i)}{\partial x^k} - t^{ki} \frac{\partial v_i}{\partial x^k}, \quad i, k = 1, 2, 3 \text{ pro } \mathbf{x} \in V \quad (1.34)$$

kteřá platí pro každý materiálový bod tělesa. Pro těleso jako celek platí

$$\underbrace{\int_V \rho(\dot{\mathbf{v}} - \mathbf{g}) \cdot \mathbf{v} dv}_{\text{změna kinetické energie těleso+projektil}} + \underbrace{\int_V t^{ki} \frac{\partial v_i}{\partial x^k} dv}_{\text{hustota deformační energie v tělese}} = \underbrace{\int_{\partial V} (\mathbf{T}_{(n)} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{v} da}_{\text{tok mechanické energie povrchem}} = (\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}) \quad (1.35)$$

Celkový výkon vnějších povrchových sil $(\mathbf{F} \cdot \mathbf{v})$ na deformovatelném tělese se jednak přemění na **kinetickou energii** soustavy těleso + projektil a jednak se **pohlí uvnitř tělesa** a následně se přemění na **elastickou a trvalou deformaci** doprovázenou i strukturálními (chemickými a fázovými) změnami. Kinetická energie dopadající střely je $m_p v_p^2 / 2$. V případě, že hmotnost tělesa $m \gg m_p$ je mnohem větší než je hmotnost projektilu m_p , jsou pak možné dva extrémní případy: střela se odrazí stejnou rychlostí $-v_p$ a její kinetická energie je opět $m_p v_p^2 / 2$ a nebo se veškerá kinetická energie pohlí v tělese a způsobí elastickou a trvalou deformaci. Množství pohlcené energie popisuje **koeficient restituce**.

16.2.1 Koeficient restituce a ztráta kinetické energie

Celková hybnost tělesa a projektilu se v průběhu srážky nemění

$$mv_0 + m_p v_p = mv + m_p v_{pout} = (m + m_p) v_{MP} = \int_{t=0}^{\Delta t} F d\tau \quad (1.36)$$

Rychlost tělesa před srážkou je v_0 a po srážce v . Rychlost projektilu v_p se po srážce změnila na rychlost v_{pout} . Těžišťová rychlost soustavy v_{MP} se v průběhu procesu nemění, a je rovna, viz obrázek č. 89

$$v_{MP} = \frac{mv_0 + m_p v_p}{m + m_p} \quad (1.37)$$

Předpokládáme, že srážka trvá časový interval Δt po který působí v místě kontaktu síla F . Uvážíme-li, že se po srážce, při které dochází k deformaci těles odráží jak projektil, tak i těleso s různými rychlostmi, bude jejich hybnost různá od hybnosti před kontaktem. Jak pro odraženou střelu, tak i pro těleso platí

$$\begin{aligned} m_p (v_{MP} - v_{pout}) &= \varepsilon_{res} m_p (v_p - v_{TP}) \quad \dots \text{změna hybnosti pro střelu} \\ m (v_{MP} - v) &= \varepsilon_{res} m (v_0 - v_{TP}) \quad \dots \text{změna hybnosti pro těleso} \end{aligned} \quad (1.38)$$

kde ε_{res} je tzv. **koeficient restituce**. Z těchto rovnic vypočteme rychlosti po odrazu

$$\begin{aligned} v_{pout} &= (1 + \varepsilon_{res}) v_{MP} - \varepsilon_{res} v_p \\ v &= (1 + \varepsilon_{res}) v_{MP} - \varepsilon_{res} v_0 \end{aligned} \quad (1.39)$$

jejich odečtením dostáváme vyjádření pro koeficient restituce

$$\varepsilon_{res} = - \frac{v - v_{pout}}{v_0 - v_p} \quad (1.40)$$

Každý reálný ráz těles je doprovázen změnou kinetické energie pohybujících se těles. Část této energie se přemění na tvarové změny a teplo

$$E_{dis} = \frac{1}{2} \frac{m m_p}{(m + m_p)} (1 - \varepsilon_{res}^2) (v - v_p)^2 \quad (1.41)$$

Pro dokonale pružný ráz je $\varepsilon_{res} = 1$ a žádná energie se nedisipuje, na druhé straně, při silné deformaci tělesa může být $\varepsilon_{res} \propto 0$.

Koeficient restituce není materiálový vztah a nemá obecnější charakter. Veličina charakterizující obecné vlastnosti těles (viskoelastických) je tenzor napětí (1.1)

16.3 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 $\varnothing D$

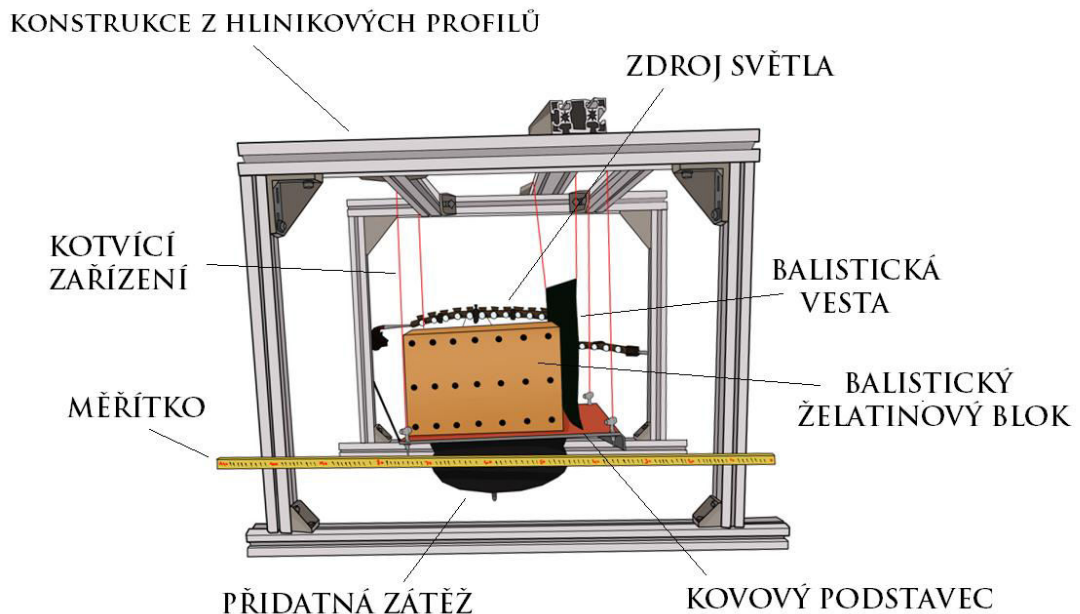
Na základě naměřených parametrů (dynamických účinků projektilu) jsou vypočteny následující dynamické účinky projektilu:

- 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

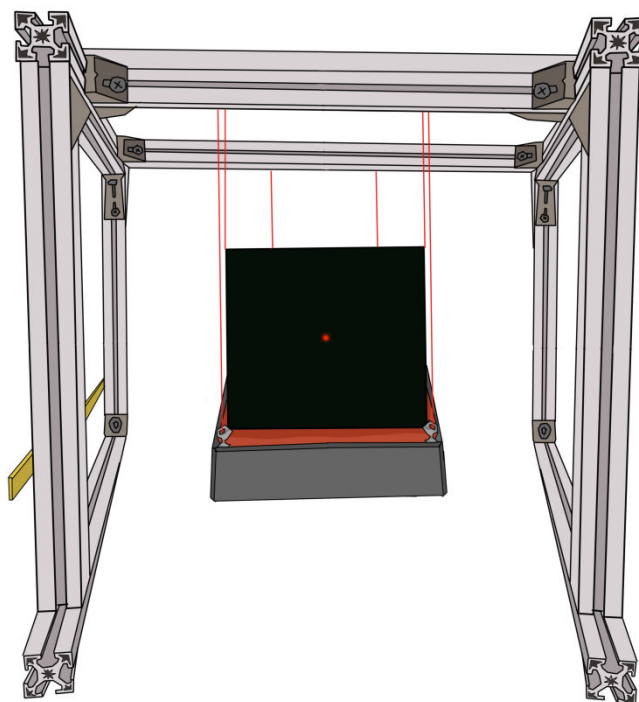
16.4 Charakteristika experimentu a jeho vyhodnocení

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), který byl vyroben a temperován stejným způsobem jako je uvedeno v kapitole č. 9.2.

Kostra experimentálního zařízení (*obrázek č. 90*) 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 tloušče 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.



Obr. 90 *Experimentální zařízení modelující chování zasaženého při reálné situaci [experimentální data]*

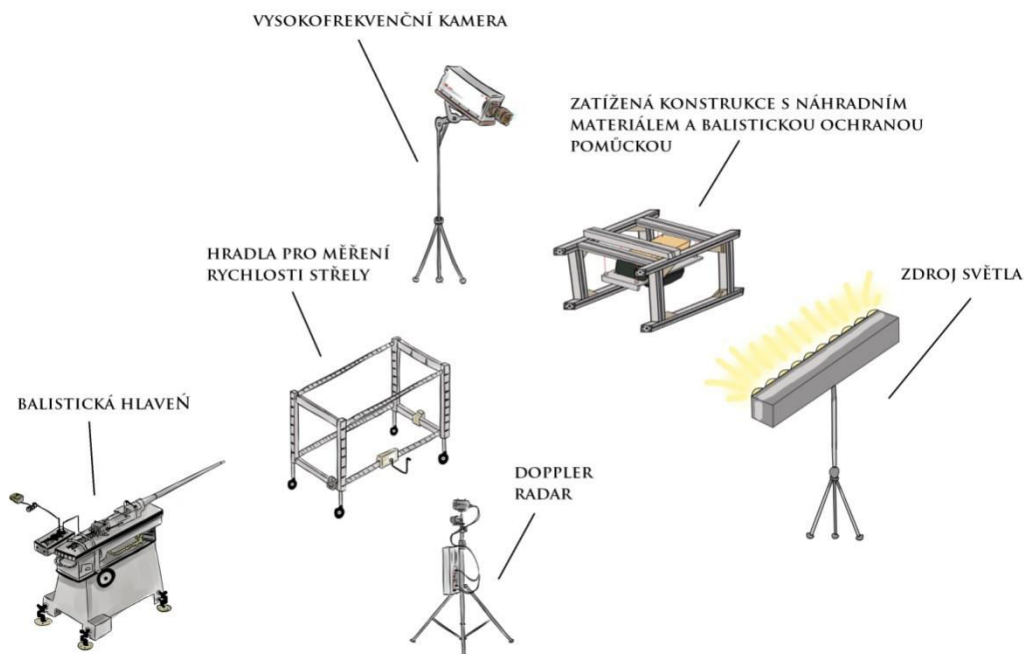


Obr. 91 Experimentální zařízení - pohled zepředu [experimentální data]

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

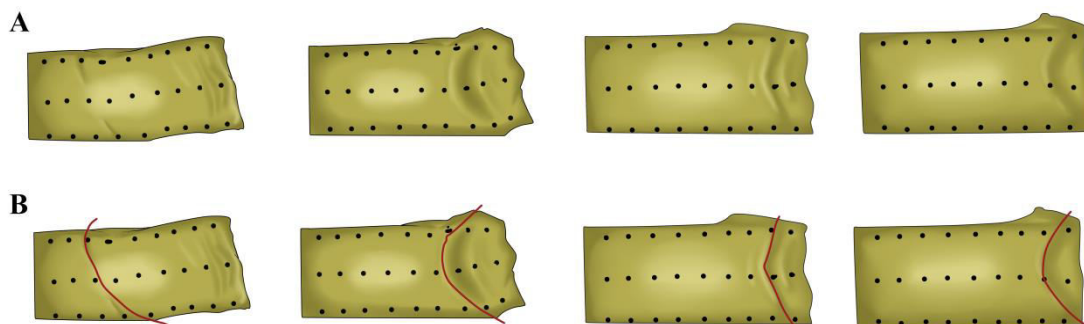
Uspořádání měřicího stanoviště je patrné z obrázku níže. Použitá munice v experimentu *9 mm Luger FMJ*, *.357 Magnum FMJ* a *.357 Magnum GOLD DOT*. Pomocí balistické hlavně, byl opticky nastaven záměrný bod, který odpovídal středu přední stěny v balistickém bloku. Po impaktu experimentální munice došlo 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. 92 Schematické uspořádání experimentu [experimentální data]

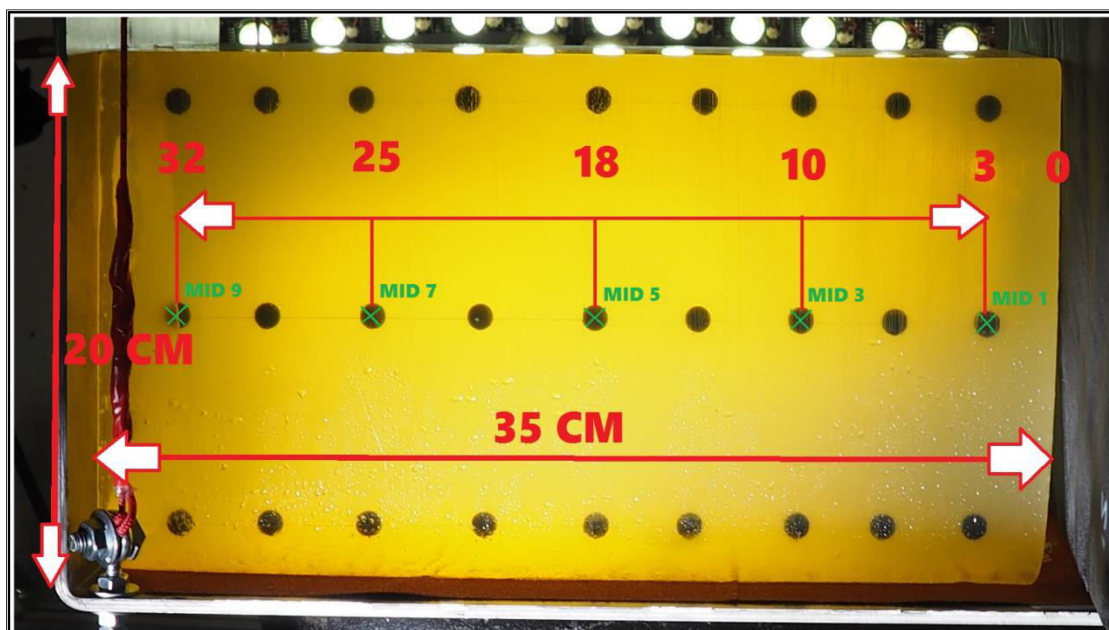
Projektíl dopadající na ochranný štít zachytí jen část kinetické energie. Zbytek této energie se přeneše jako vlna nesoucí **kinetickou** a **tlakovou energii** do viskoelastického tělesa (obrázek č. 93).



Obr. 93 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.

Účinky této vlny jsou zaznamenány formou výchylky a rychlosti v materiálových bodech **MID 1** až **MID 9**, viz *obrázek č. 94*. Jejich vyhodnocení je uvedeno v *tabulce č. 23*.

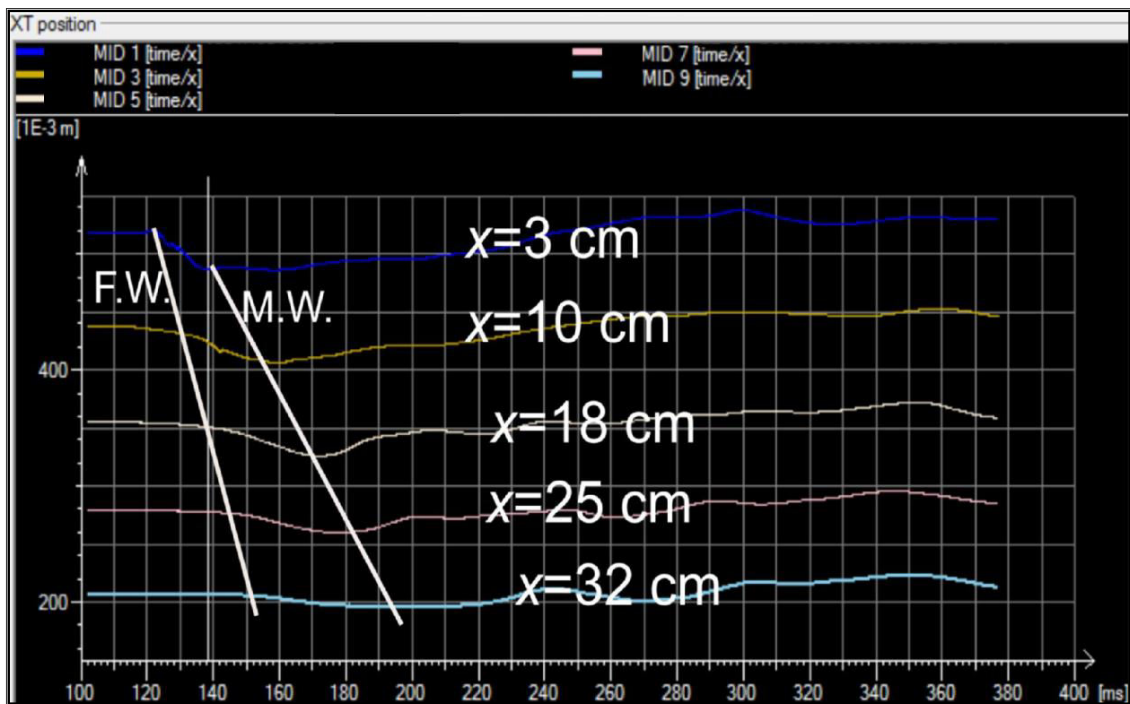


Obr. 94 Rozmístění sledovaných markerů v balistické želatině; rozměry želatinového kvádru [*experimentální data*]

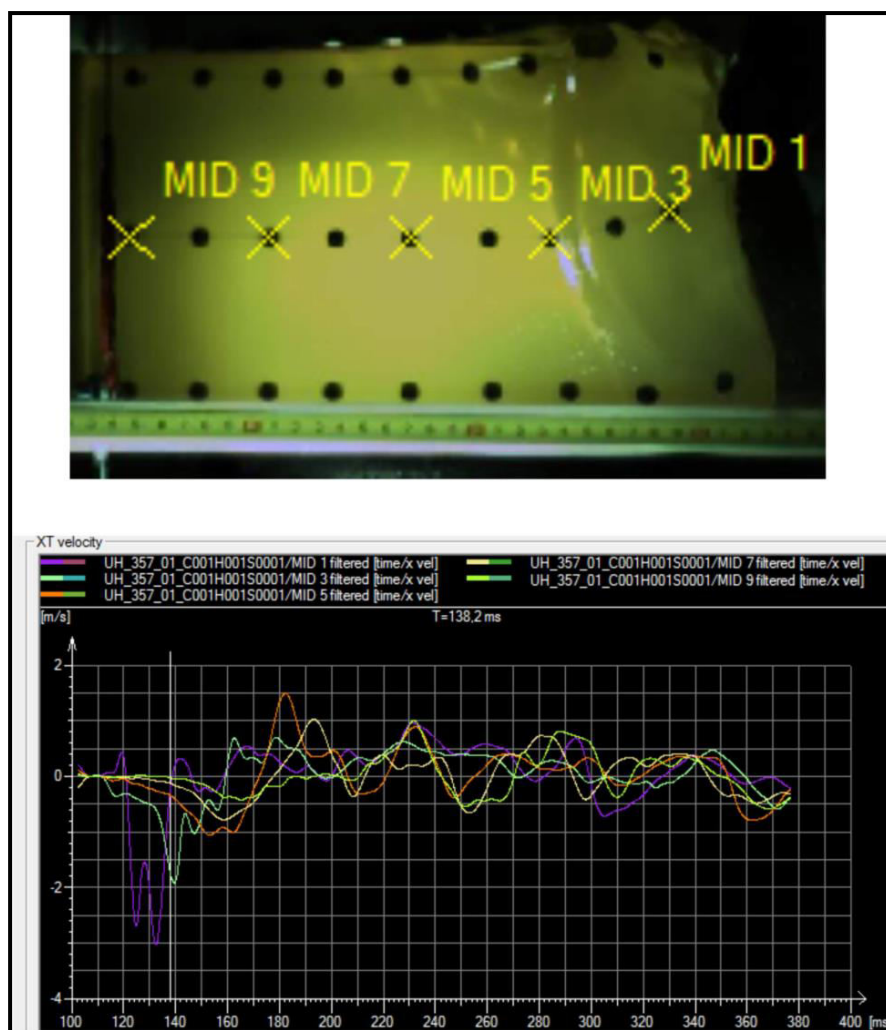
Tab. 23 Maximální výchylka $u_{xi} = u_x(x_i, t)$ testovacího (materiálového) bodu pro střelu .357 Magnum FMJ. Rychlost vlny je stanovena z rychlosti postupu maxima výchylky., viz *obrázek č. 95* [*experimentální data*]

x_i [m]	0.03	0.1	0.18	0.25	0.32
u_{xi} [m]	0.038	0.030	0.025	0.018	0.005
v_{xi} [m/s]	4.5	5.0	5.0	5.5	4.8

Legenda: x_i - vzdálenost sledovaného markerů MID 1-9; u_{xi} - maximální výchylka markerů; v_{xi} - šíření podélné rychlosti vlny



Obr. 95 Šíření deformační vlny amplitudy $u_{0,x} = 69$ mm. Disperse vlny je patrna jen pro $x \leq 10$ cm. Rychlost šíření počátku vlny F.W. (Front Wave) a maxima vlny M.W. (Max. Wave) [experimentální data zpracovány v software QVA Qualisys]



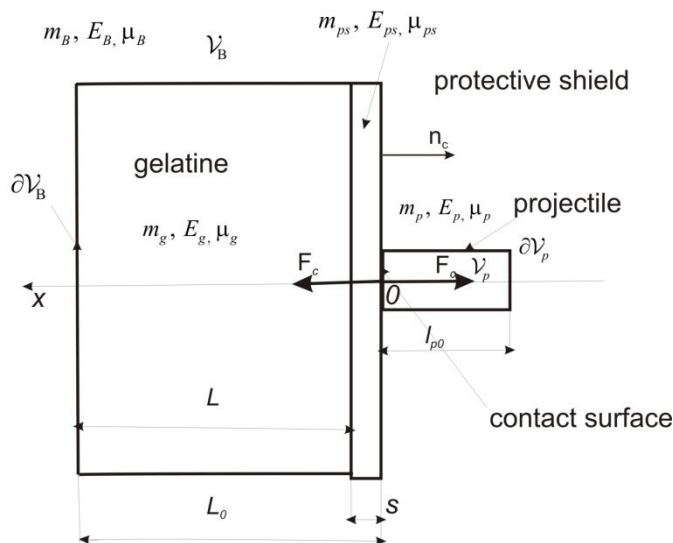
Obr. 96 Šíření podélné rychlostní vlny $v_x(x, t)$. Její amplituda v bodě $x_1 = 3 \text{ cm}$ je $v_x(x_1 = 3 \text{ cm}) = v_{x_1} = 3 \text{ m/s}$ při frekvenci $\omega = 2\pi/\tau = 120 \text{ s}^{-1}$, pro $\tau/4 = 0.013 \text{ s}$.

Vlnový vektor (číslo) je $k_x = \omega/v_{x1} = 2\pi/l_x = 2\pi/(4u_{x1}) = 6.28/(4 \cdot 0.04) \approx 40 \text{ m}^{-1}$.

Z obrázku je patrné rozštěpení vlny (fialová křivka) zřejmě způsobené interakcí projektilu s vnějším okrajem štítu (první vlna) a s jeho vnitřním okrajem (druhá vlna) [experimentální data zpracovány v software QVA Qualisys]

16.5 Interakce projektilu s ochranným štítem

Pro posouzení interakce projektilu s ochranným štítem vyjdeme z bilance hybnosti (1.24) ve které zanedbáme vliv gravitace. Jde o kontakt dvou těles, kde neznámou je kontaktní síla \mathbf{F}_c . Těleso na které dopadá projektil má objem V_B a povrch ∂V_B . Za těleso, index "B" považujeme soustavu želatina "g" a ochranný štít "ps". Projektil má objem V_p a povrch ∂V_p , viz obrázek č. 97



Obr. 97 *Výměna hybnosti (energie) při nárazu probíhá přes kontaktní povrch, s vnější normálou $\mathbf{n}_c = (-1, 0, 0)$, kde vzniká kontaktní síla \mathbf{F}_c . Tato síla způsobuje deformaci obou těles a je v rovnováze se silami na povrchu obou těles [experimentální data]*

Legenda: *gelatine* - balistická želatina; *protective shield* - BOP; *projectile* - zbraňový systém; *contact surface* - zasažená kontaktní plocha při impaktu

Tudíž pro obě tělesa platí

$$\underbrace{\int_V \rho \dot{v} dv}_{\text{setrvačnost}} - \int_{\partial V} \underbrace{\mathbf{T}_{(n)} \mathbf{n} da}_{\text{změny uvnitř}} = \mathbf{F}_c \quad \text{pro} \quad \mathbf{T}_{(n)}^i = t^{ki} n_k = K e_{(1)} n_i + 2 \left(\hat{\mu} e^{ik} + \mu d^{ik} \right) n_k \quad (4.1)$$

takže se kontaktní silou dá těleso jednak do pohybu (popř. se zbrzdí) a jednak dojde ke **změnám uvnitř tělesa**, tj. elastická a plastická deformace.

Odhadneme nejdříve velikost kontaktní síly. Tato síla je určena pohybovou energií projektilu a dráhou x_{\max} na které se projektil zastaví. Tudíž projektil o hmotnosti m_p pohybující se rychlostí \mathbf{v}_p s odpovídající kinetickou energií způsobí sílu $\mathbf{F}_c = (F_{cx}, 0, 0)$

$$\frac{m_p v_p^2}{2} = \int_0^{x_{\max}} \mathbf{F}_c(x, t) dx \quad (4.2)$$

V místě kontaktu působí jen tato povrchová síla, viz obrázek č. 97 a č. 98. Velikost této síly závisí na **době interakce střely s povrchem tělesa** ∂V . Doba interakce závisí na rychlosti zbrzdění střely, její rychlost v průběhu interakce označíme $\mathbf{v}_c = (v_{cx}(x, t), 0, 0)$ a budeme ji považovat za neznámou. Dráha zbrzdění x_{\max} je určena viskoelastickými vlastnostmi obou těles a je rozhodující veličinou pro stanovení účinku střely.

Obvykle se průnik řeší sofistikovanými programy pomocí speciálních programů. Možný je i přibližný **analytický přístup, kdy můžeme dostat vztahy, ze kterých jsou patrné závislosti jednotlivých materiálových a geometrických parametrů**. Zaměříme se na analytický postup kontaktu dvou těles.

16.5.1 Materiálový model tělesa s ochranným štítem a projektilu

Předpokládejme, že jak těleso, tak i projektil jsou viskoelastické materiály. Napětí rozdělíme na elastické a disipativní

$$p = p_{el}(\varepsilon^m) + p_{dis}((\dot{\varepsilon})^{2n-1}) \quad (4.3)$$

kde elastická část napětí závisí jen na **deformaci** ε a část disipativní (popisující creep-tečení materiálu) závisí na **rychlosti deformace** $\dot{\varepsilon}$. Exponenty m, n jsou materiálové konstanty určené experimentálně.

Jedním z používaných materiálových vztahů modelujících tečení materiálu (vhodný pro kovové materiály) je tzv. Nortonův-Baileyův zákon

$$p_{dis} = 2\mu_{cr} \left(\frac{2}{3}\right)^n \dot{\varepsilon}^{2n-1}, \quad \mu_{cr} \dots \text{mez kluzu} \quad (4.4)$$

pro $n=1$ se materiál chová jako newtonovská tekutina a pro $n=0.5$ se chová jako materiál tuhý s mezí kluzu μ_{cr} . Tento model je vhodný pro materiál projektilu a materiál ochranného štítu.

V našem přiblížení se z počátku omezíme na lineární materiály. Rozšíření na obecnější (nelineární) materiály (4.3) je podle potřeb možné. Uvedený postup takové rozšíření umožňuje. S ohledem na vztah (4.3) můžeme pro materiály srážky psát

$$\begin{aligned} p_c &= p_{c,el} + p_{c,dis}, \quad p_B = p_{B,el} + p_{B,dis}, \quad p_p = p_{p,el} + p_{p,dis}, \\ p_c &= E_c \varepsilon_c + \mu_c \dot{\varepsilon}_c, \quad p_p = E_p \varepsilon_p + \mu_p \dot{\varepsilon}_p, \quad p_B = E_B \varepsilon_B + \mu_B \dot{\varepsilon}_B \end{aligned} \quad (4.5)$$

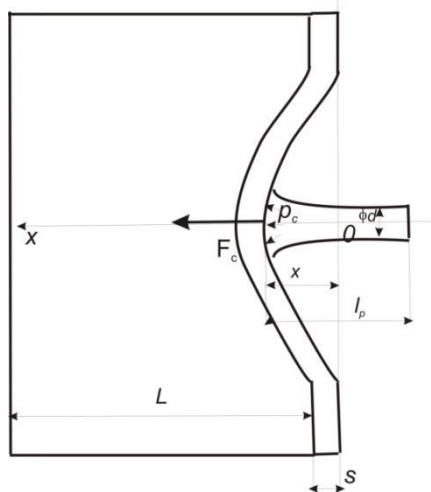
Indexem "c" jsme označily parametry na kontaktní ploše. Předpokládáme, že relativní deformace a jejich rychlosti jsou jednoosé (ve směru osy x), viz *obrázek č. 96*,

$$\varepsilon_c = \frac{(L_0 - x + l_p) - (L_0 + l_{p0})}{L_0 + l_{p0}}, \quad \varepsilon_B = \frac{(L_0 - x) - L_0}{L_0}, \quad \varepsilon_p = \frac{l_p - l_{p0}}{l_{p0}} \quad (4.6)$$

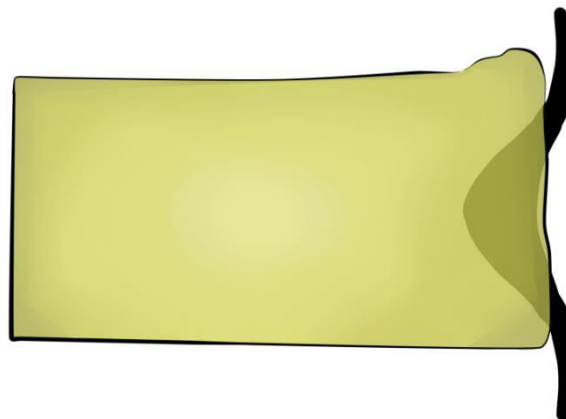
$$\dot{\varepsilon}_c = \frac{-\dot{x} + \dot{l}_p}{L_0 + l_{p0}}, \quad \dot{\varepsilon}_B = -\frac{\dot{x}}{L_0}, \quad \dot{\varepsilon}_p = \frac{\dot{l}_p}{l_{p0}}$$

Indexem "B" jsme označily soustavu (těleso) složené z ochranného štítu "ps" a z želatiny "g", viz *obrázek č. 97*. Ke stanovení celkové elasticity E_c a celkové viskozity kontaktu μ_c použijeme předpokladu o rovnosti tlaků v místě kontaktu

$$p_c = E_c \varepsilon_c + \mu_c \dot{\varepsilon}_c = E_p \varepsilon_p + \mu_p \dot{\varepsilon}_p = E_B \varepsilon_B + \mu_B \dot{\varepsilon}_B \quad (4.7)$$



Obr. 98 Interakce projektilu s ochranným štítem [experimentální data]



Obr. 99 Grafické zobrazení průhybu balistické ochranné pomůcky (BOP) přiložené na NM po impaktu [experimentální data]

Tento obecný vztah nedovoluje jednoduše určit vztah mezi E_c a E_B a podobně mezi celkovou viskozitou μ_c a viskozitami interagujících těles μ_B, μ_p , proto proces přenosu sil dále zjednodušíme předpokladem

$$\begin{aligned} p_{c,el} &= E_c \varepsilon_c = p_{B,el} = E_B \varepsilon_B = p_{p,el} = E_p \varepsilon_p, \\ p_{c,dis} &= \mu_c \dot{\varepsilon}_c = p_{B,dis} = \mu_B \dot{\varepsilon}_B = p_{p,dis} = \mu_p \dot{\varepsilon}_p \end{aligned} \quad (4.8)$$

Předpokládá, že **elastické a disipativní složky napětí jsou si rovny**. Tento předpoklad je oprávněn v případech, kdy elasticita jednotlivých částí je alespoň řádově stejná. V tom případě je přenos elastické části energie je v těchto částech podobný a lze jej oddělit od energie disipativní (např. tečení a trvalá deformace).

Navíc přenos elastické energie se děje rychlostmi o několik řádů vyšší než plastická deformace. S ohledem na tento předpoklad můžeme nahradit ε_c deformacemi $\varepsilon_B, \varepsilon_p$ a podobně i pro jejich rychlosti, takže můžeme psát

$$\frac{p_{c,el}}{E_c} = \frac{-x + l_p - l_{p0}}{L_0 + l_{p0}} = \frac{\frac{p_{B,el} L_0}{E_B} + \frac{p_{p,el} l_{p0}}{E_p}}{L_0 + l_{p0}}, \text{ nebo-li } E_c = \frac{E_B E_p (L_0 + l_{p0})}{L_0 E_p + l_{p0} E_B} \quad (4.9)$$

Stejným postupem stanovíme celkovou viskozitu

$$\mu_c = \frac{\mu_B \mu_p (L_0 + l_{p0})}{L_0 \mu_p + l_{p0} \mu_B} \quad (4.10)$$

Zbývá stanovit relaci mezi deformací tělesa a projektilu. Použijeme předpoklad (4.8) a definice deformací (4.6), takže platí

$$l_p - l_{p0} = -\frac{x E_B l_{p0}}{E_p L_0}, \quad \dot{l}_p = -\frac{\dot{x} \mu_B l_{p0}}{\mu_p L_0} \quad (4.11)$$

Za těchto předpokladů má tlak (4.5) v místě kontaktu konečný tvar

$$p_c = E_c \varepsilon_c + \mu_c \dot{\varepsilon}_c = -E_c \frac{x (E_p L_0 + E_B l_{p0})}{E_p L_0 (L_0 + l_{p0})} - \mu_c \frac{\dot{x} (\mu_p L_0 + \mu_B l_{p0})}{\mu_p L_0 (L_0 + l_{p0})} \quad (4.12)$$

Zavedeme označení

$$\tilde{E}_c = E_c \frac{(E_p L_0 + E_B l_{p0})}{E_p L_0 (L_0 + l_{p0})}, \quad \tilde{\mu}_c = \mu_c \frac{(\mu_p L_0 + \mu_B l_{p0})}{\mu_p L_0 (L_0 + l_{p0})} \quad (4.13)$$

takže tlak na povrch tělesa (ochranného štítu) je

$$p_c = -\tilde{E}_c x - \tilde{\mu}_c \dot{x} \quad (4.14)$$

a dovoluje nám stanovit velikost kontaktní síly.

16.5.2 Kontaktní síla při nárazu a velikost průniku

Vektor výsledné síly je s ohledem na vztah (4.14) roven

$$\mathbf{F}_c = (F_{cx}, 0, 0) = \int_{A_p} p_c \mathbf{n}_c da = \frac{\pi d_p^2}{4} (-\tilde{E}_c x - \tilde{\mu}_c \dot{x}) \cdot (-1, 0, 0) = \left(\frac{\pi d_p^2}{4} (\tilde{E}_c x + \tilde{\mu}_c \dot{x}), 0, 0 \right) \quad (4.15)$$

viz *obrázek č. 97* - explicitní tvar této síly je výchozí ke stanovení průniku projektilu x_{\max} ochranným štítem. Tato síla závisí vedle **velikosti průhybu** x i na **rychlosti zbrzdění střely** $\mathbf{v}_c = (\dot{x}, 0, 0)$.

V prvním přiblížení můžeme použít lineární interpolace a položit $\dot{x} = v_p / 2$. Ze vztahu (4.2) pro kinetickou energii střely dostáváme pro velikost průniku

$$\begin{aligned} \frac{m_p v_p^2}{2} &= \int_0^{x_{\max}} \frac{\pi d_p^2}{4} (\tilde{E}_c x + \tilde{\mu}_c \dot{x}) dx = \int_0^{x_{\max}} \frac{\pi d_p^2}{4} \left(\tilde{E}_c x + \tilde{\mu}_c \frac{v_p}{2} \right) dx = \\ &= \frac{\pi d_p^2}{4} \left(\tilde{E}_c \frac{x_{\max}^2}{2} + \tilde{\mu}_c \frac{v_p}{2} x_{\max} \right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Řešení této kvadratické rovnice dostáváme **pro maximální hloubku průniku** projektilu do tělesa, viz *obrázek č. 98*, konečný vztah

$$x_{\max} = \frac{v_p}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{\tilde{\mu}_c}{\tilde{E}_c} \right)^2 + \frac{16m_p}{\pi d^2 \tilde{E}_c}} - \frac{\tilde{\mu}_c}{\tilde{E}_c} \right] \quad (4.17)$$

Z tohoto vztahu plyne, že hloubka x_{\max} je úměrná dopadové rychlosti střely v_p a silně klesá s rostoucí elasticitou \tilde{E}_c (4.13). Konkrétní materiálové a geometrické parametry experimentu jsou uvedeny v *tabulce č. 24*.

Dosažením hodnot z *tabulky č. 24* do vztahů (4.9) a (4.10) vypočteme elasticitu a viskozitu tělesa, tj. soustavy želatina plus ochranný štít, tudíž

$$\begin{aligned} E_B &= \frac{E_g E_{ps} (L+s)}{L E_p + s E_g} = \frac{2.4 \cdot 10^9 \cdot 4.5 \cdot 10^9 (0.35+0.14)}{0.35 \cdot 4.5 \cdot 10^9 + 0.14 \cdot 2.4 \cdot 10^9} = 2.77 \cdot 10^9 \text{ Pa}, \\ \mu_B &= \frac{\mu_g \mu_{ps} (L+s)}{L \mu_{ps} + s \mu_g} = \frac{40 \cdot 1.6 \cdot 10^8 (0.35+0.14)}{0.35 \cdot 1.6 \cdot 10^8 + 0.14 \cdot 40} = 56 \text{ Pa s} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Tab. 24 Geometrické a materiálové parametry těles a materiálů použitých při experimentu, viz obrázek č. 97 [experimentální data]

	délka/rozměr [mm]	hmotnost [kg]	Elastický modul [GPa]	Viskozita/mez kluzu*) [Pa · s] / [Pa]
Projektil	39.9			
	8.79	0.0153	14	$7.0 \cdot 10^5 \div 10^7$
Ochranný štít	14 - tloušťka			
	200 x 200	4-5	3.0 - 4.5	$10^6 \div 1.6 \cdot 10^8$ **)
Želatina	350			40
	200 x 200	13	2.4	-----

Legenda: *) mez kluzu je použita pro odhad viskozity podle vztahu (4.4); **) pokles meze kluzu je způsoben vzájemným posuvem vláken

Odtud je patrné, že jak výsledná elasticita, tak i viskozita jsou blíže hodnotám té části tělesa, která má nižší hodnoty. Jinými slovy výsledné hodnoty určuje ta poddajnější komponenta. Opětovným použitím vztahů (4.9) a (4.10) vypočteme celkové hodnoty parametrů E_c, μ_c , kde $L_0 = L + s = 0.35 + 0.014 = 0.364$ m. Tudíž

$$E_c = \frac{E_B E_p (L_0 + l_{p0})}{L_0 E_p + l_{p0} E_B} = \frac{2.77 \cdot 10^9 \cdot 14 \cdot 10^9 \cdot (0.364 + 0.0399)}{0.364 \cdot 14 \cdot 10^9 + 0.0399 \cdot 2.77 \cdot 10^9} = 3.01 \cdot 10^9 \text{ Pa} \quad (4.19)$$

$$\mu_c = \frac{\mu_B \mu_p (L_0 + l_{p0})}{L_0 \mu_p + l_{p0} \mu_B} = \frac{56 \cdot 10^7 (0.364 + 0.0399)}{0.364 \cdot 10^7 + 0.0399 \cdot 56} = 62 \text{ Pa s}$$

Nakonec stanovíme modifikované parametry (4.13)

$$\tilde{E}_c = E_c \frac{(E_p L_0 + E_B l_{p0})}{E_p L_0 (L_0 + l_{p0})} = 3.01 \cdot 10^9 \frac{(14 \cdot 10^9 \cdot 0.364 + 2.77 \cdot 10^9 \cdot 0.0399)}{14 \cdot 10^9 \cdot 0.364 (0.364 + 0.0399)} = 7.61 \cdot 10^9 \text{ Pa m}^{-1}, \quad (4.20)$$

$$\tilde{\mu}_c = \mu_c \frac{(\mu_p L_0 + \mu_B l_{p0})}{\mu_p L_0 (L_0 + l_{p0})} = 62 \frac{(10^7 \cdot 0.364 + 56 \cdot 0.0399)}{10^7 \cdot 0.364 \cdot (0.364 + 0.0399)} = 153 \text{ Pa s m}^{-1}$$

Maximální délka průniku závisí především na elasticitě tělesa, tj. E_B , která je určena elasticitou ochranného štítu E_{ps} a elasticitou želatiny E_g , viz vztah (4.18).

Poměr

$$\left(\frac{\tilde{\mu}_c}{\tilde{E}_c}\right)^2 = \left(\frac{153}{7.61} \cdot 10^{-9}\right)^2 = 4.04 \cdot 10^{-16} \text{ s} \quad (4.21)$$

je zanedbatelný vůči členu

$$\frac{16m_p}{\pi d_p^2 \tilde{E}_c} = \frac{16 \cdot 0.0153}{3.14 \cdot (0.00879)^2 \cdot 7.61 \cdot 10^9} = 1.33 \cdot 10^{-7} \text{ s} \quad (4.22)$$

Výsledná hodnota průniku je podle vztahu (4.17) pro dopadovou rychlost $v_p = 375 \text{ m/s}$ rovna

$$x_{\max} = \frac{v_p}{2} \sqrt{\frac{16m_p}{\pi d_p^2 \tilde{E}_c}} = \frac{375}{2} \sqrt{1.33 \cdot 10^{-7}} = 68 \text{ mm} \quad (4.23)$$

Tato hodnota je téměř totožná s naměřenou výchylkou $u_{0x} = 69 \text{ mm}$ v okamžiku dopadu, viz obrázek č. 95. **Naměřené hodnoty se mohou lišit v důsledku deformace projektilu.**

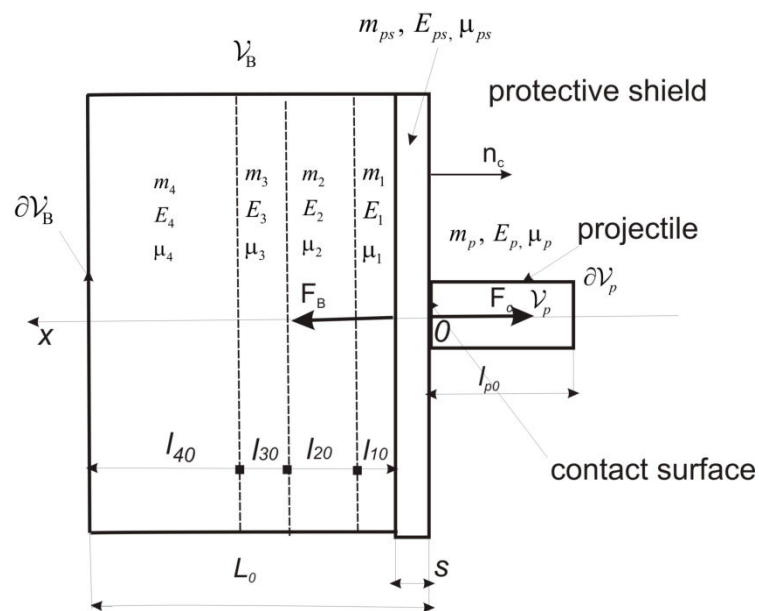
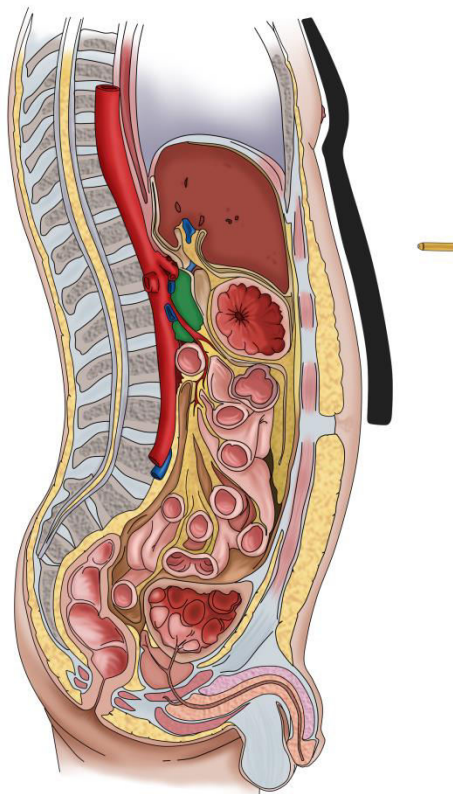
Jestliže budeme předpokládat, že má projektil zašpičaté čelo a vezmeme jeho efektivní průměr, např. $d_{pef} = 8 \text{ mm}$, potom je hloubka průniku větší, $x_{\max} = 0.075 \text{ m}$, což koresponduje se zkušeností, že špičaté střely pronikají hlouběji.

16.5.3 Elastické vlastnosti tělesa sendvičového typu

Lidskou tkáň si lze představit jako těleso složené z více vrstev, např. kůže, podkožní vrstva tuku, vnitřní orgán apod. Označíme postupně l_{i0}, l_i pro $i = 1, 2, \dots$ tloušťku vrstvy před deformací a po deformaci. Každá z těchto vrstev má jiné elastické vlastnosti

$$E_i = \frac{p_i}{\varepsilon_i}, \text{ kde } p_i = p, \varepsilon_i = \frac{l_i}{l_{i0}} \text{ pro } i = 1, 2, \dots \quad (4.24)$$

viz obrázek č. 100, což značně ovlivňuje elasticitu E_B celého tělesa používanou pro stanovení elasticity



Obr. 100 Sagitální průřez lidským tělem vč. BOP - vzhledem k rozdílným elastickým vlastnostem každé vrstvy lidského organismu (kůže, podkoží, měkké tkáně, kosti, orgánová soustava) jsme schopni dopočítat elasticitu E_B celého těla za pomocí elasticity z různých materiálových vrstev [experimentální data]

Legenda: protective shield - BOP; projectile - zbraňový systém; contact surface - zasažená kontaktní plocha při impaktu

\tilde{E}_c v rovině kontaktu, viz vztah (4.20) a následně i velikost průniku (4.23) . Elasticita E_B je závislá na elasticitě E_i jednotlivých vrstev podle vztahu

$$\frac{1}{E_B} = \frac{s}{E_{ps}L_0} + \sum_{i=1,2,\dots} \frac{r_i}{E_i}, \text{ pro } r_i = \frac{l_{i0}}{L_0} \quad (4.25)$$

16.5.4 Odezva tělesa a projektilu v okamžiku kontaktu

Budeme-li řešit účinek dopadu projektilu na těleso a opačně i vliv tělesa na projektil. Vyjdeme z rovnice rovnováhy sil (4.1) kde působící silou jak na těleso, tak i na projektil je síla (4.15), tj.

$$\mathbf{F}_c = (F_{cx}, 0, 0) = \int_{A_p} p_c \mathbf{n}_c da = \left(\frac{\pi d^2}{4} (\tilde{E}_c x + \tilde{\mu}_c \dot{x}), 0, 0 \right) \quad (4.26)$$

Želatinu společně s ochranným štítem budeme považovat za jedno těleso o objemu V_B a hmotnosti $m_B = 75 \text{ kg}$, viz obrázek č. 97, s celkovou elasticitou $E_B = 2.77 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ a viskozitou 56 Pa s .

Vyjdeme z rovnováhy sil (1.25)

$$\int_{V_B} \rho \dot{v}^i dv = \int_{V_B} \frac{\partial t^{ki}}{\partial x^k} dv = \int_{\partial V_B} t^{ki} n_k da, \text{ jen pro } i, k = 1, \text{ tj., ve směru } x \cdots 1D \text{ approx. (4.27)}$$

Předpokládáme homogenní kvádr s průřezem $A_B = 0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ počáteční délky $L_0 = 0.364 \text{ m}$ (želatina plus ochranný štít). Tento předpoklad není zcela reálný, protože projektil působí jen na mnohem menší ploše, přibližně velikosti $\pi D^2 / 4$, viz obrázek č. 98.

Je tudíž reálnější uvažovat místo celého průřezu tělesa $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$, jen

průřez skutečně zasažený $A_B = \pi D^2 / 4$, kde průměr D bude jen o něco větší než průměr projektilu d_p , jehož průřez je $A_p = \pi d_p^2 / 4 = 6.065 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, viz obrázek č. 101.

Velikost průměru D odhadneme z **objemu materiálu vytěsněného deformací** povrchu. Relativní deformace ochranného štítu lze pro případ malých deformací (tj., pro $x_{\max} \leq d_p$) aproximovat funkcí

$$h(x, r) = \frac{(1 - \sigma_B^2) F_{cx}}{\pi E_B r} + \frac{(1 + \sigma_B) x^2 F_{cx}}{2\pi E_B r^3} \quad (4.28)$$

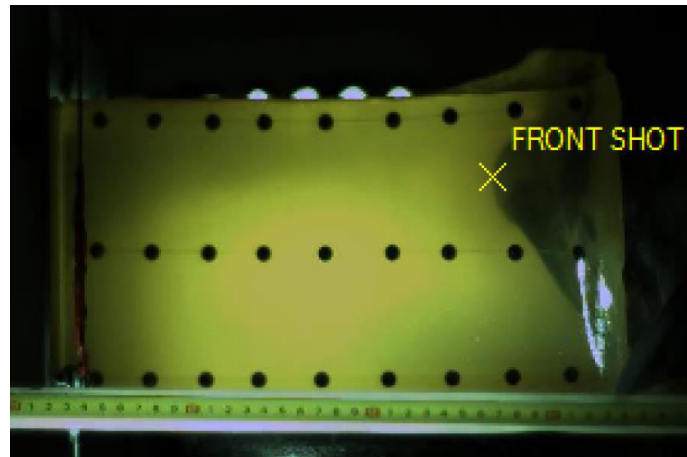
Pro případ velkých deformací použijeme aproximaci tohoto vztahu ve tvaru

$$h(r) = x_{\max} \left(\frac{d_p + \Delta}{2r} \right)^\delta \quad \text{pro } r \geq \frac{d_p + \Delta}{2} \quad (4.29)$$

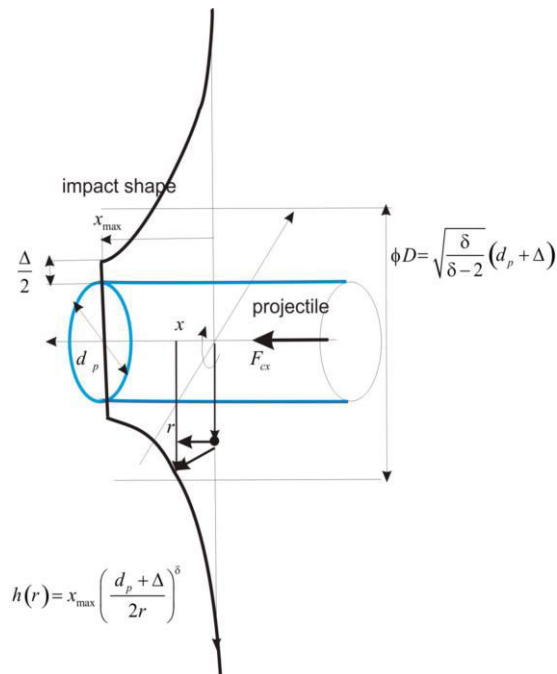
Parametry x_{\max}, δ, Δ závisí na typu ochranného štítu a na dynamice kontaktu. Objem vytěsněný deformací je

$$V_{def} = \pi \int_0^{x_{\max}} r^2 dx = \pi \frac{(d_p + \Delta)^2}{4} x_{\max}^{2/\delta} \int_0^{x_{\max}} \frac{dx}{x^{2/\delta}} = \pi \frac{\delta (d_p + \Delta)^2 x_{\max}}{4(\delta - 2)} \quad (4.30)$$

a)



b)



Obr. 101 Tvar povrchu ochranného štítu po kontaktu s projektilem [experimentální data]

a) Experiment; odezva v želatině chráněném ochranném štítu po dopadu projektilu.

b) Model interakce. Zavedení deformací vytěsněného objemu $V_{def} = \pi D^2 x_{\max} / 4$

a odpovídající válcový objem $A_B x_{\max} = V_{def}$ o velikosti průměru D je dán vztahem

$$\pi \frac{\delta (d_p + \Delta)^2}{4(\delta - 2)} x_{\max} = \frac{\pi D^2}{4} x_{\max}, \text{ tedy } D = \sqrt{\frac{\delta}{\delta - 2}} (d_p + \Delta) \quad (4.31)$$

Element objemu je $dv = A_B dx$, pak lze rovnováhu sil (4.27) psát ve tvaru

$$\int_{V_B} \rho \dot{v}_x dv - \int_{\partial V_B} t^{ki} n_k da = F_{cx}, \text{ popř.} \quad (4.32)$$

$$m_B \ddot{x}_B - A_B t_{xx} n_x|_L - A_B t_{xx} n_x|_x = F_{cx}$$

Normála na povrchu kontaktu je $n = (-1, 0, 0)$, viz obrázek č. 101 b)

Povrch objemu tělesa ∂V_B je tvořen povrchem v bodě $x = L$ o průřezu $A_B = 0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$, kde povrchovou sílu zanedbáváme (v okamžiku dopadu projektilu na těleso z této strany nepůsobí žádná síla) tj, $t_{xx}|_L = 0$ a bočními povrchy, na které rovněž žádné povrchové síly nepůsobí. Jediné síly působí v bodě x a to reakce materiálu tělesa, která je dána tenzorem napětí

$$t_{xx} n_x|_x = p_{B,el} + p_{B,dis} = E_B \varepsilon_B + \mu_B \dot{\varepsilon}_B = -E_B \frac{x}{L_0} - \mu_B \frac{\dot{x}}{L_0} \quad (4.33)$$

a povrchovou silou (4.26). Pozn: Veličina $t_{xx} n_x|_x$ je měrnou silou (odporem tělesa) proti stlačování (proti kompresi (4.6)) a působí ve směru $\mathbf{n} = (-1, 0, 0)$, takže snižuje velikost zrychlení (analogie pružiny).

Za předpokladu, že se povrchy obou těles nerozpojí, dostáváme dosazením vztahů (4.33) a (4.26) do rovnice rovnováhy sil (4.32) rovnici pro deformaci tělesa, jinými slovy, rovnici pro pohyb kontaktní plochy z hlediska tělesa

$$m_B \ddot{x}_B + \left(\frac{A_B E_B}{L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c \right) x_B + \left(\frac{A_B \mu_B}{L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{\mu}_c \right) \dot{x}_B = 0 \quad (4.34)$$

Podobně dostaneme rovnici pro deformaci projektilu

$$m_p \ddot{x}_p + \left(\frac{A_p E_p}{l_{p0}} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c \right) x_p + \left(\frac{A_p \mu_p}{l_{p0}} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{\mu}_c \right) \dot{x}_p = 0 \quad (4.35)$$

Jde o lineární rovnice s tlumícími členy a můžeme je formálně zapsat ve tvaru

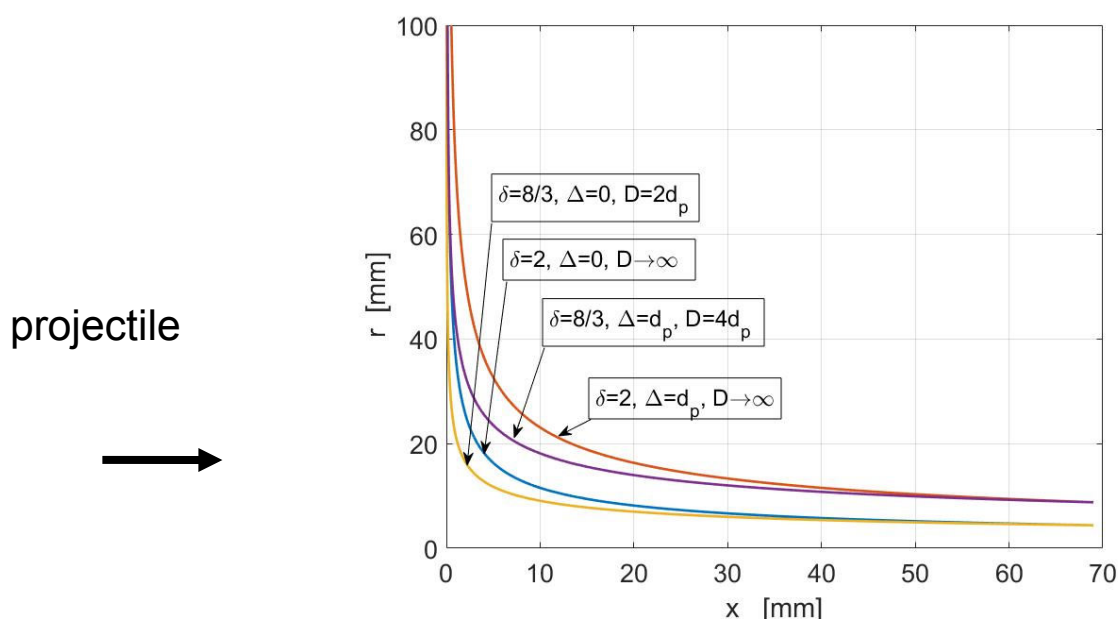
$$\begin{aligned} m_B \ddot{x}_B + M_B \dot{x}_B + E_B x_B &= 0, \\ m_p \ddot{x}_p + M_p \dot{x}_p + E_p x_p &= 0 \end{aligned} \quad (4.36)$$

kde jsme zavedli následující označení

$$E_B = \frac{A_B E_B}{L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c, \quad E_p = \frac{A_p E_p}{l_{p0}} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c \quad (4.37)$$

$$M_B = \frac{A_B \mu_B}{L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{\mu}_c, \quad M_p = \frac{A_p \mu_p}{l_{p0}} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{\mu}_c, \quad (4.38)$$

Ekvivalentní plochu $A_B = \pi D^2 / 4$, kterou působí projektil na těleso a plochu $A_p = \pi d_p^2 / 4$ kterou působí projektil na ochranný štít budeme považovat za neznámé a stanovíme je později.



Obr. 102 Průběh zakřivení povrchu štítu po dopadu projektilu při použití deformovaného objemu V_{def} , viz obrázek č. 101 b) [experimentální data]

Řešení rovnic (4.36) hledáme ve tvaru

$$x(t) = x_0 \exp(i\omega t) \quad (4.39)$$

Dosazením do rovnic (4.36) dostáváme disperzní rovnice

$$\begin{aligned} -m_B \omega_B^2 + iM_B \omega_B + E_B &= 0 \\ -m_p \omega_p^2 + iM_p \omega_p + E_p &= 0 \end{aligned} \quad (4.40)$$

a jejich řešením je

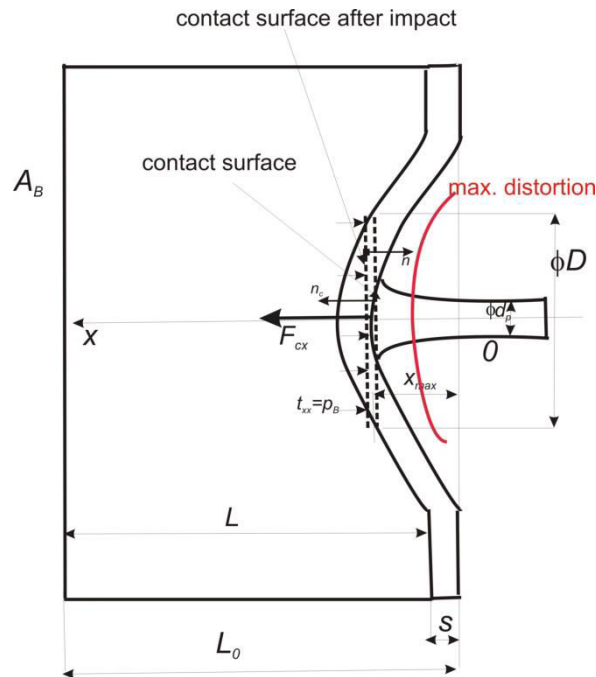
$$\omega_{B1,2} = \frac{iM_B}{2m_B} \pm \sqrt{\frac{E_B}{m_B} - \left(\frac{M_B}{2m_B}\right)^2} = i\gamma_B \pm \omega_B, \quad (4.41)$$

$$\omega_{p1,2} = \frac{iM_p}{2m_p} \pm \sqrt{\frac{E_p}{m_p} - \left(\frac{M_p}{2m_p}\right)^2} = i\gamma_p \pm \omega_p$$

Hledáme řešení, které splňuje počáteční podmínky

$$x(t=0) = 0, \quad \dot{x}(t=0) = v_c \quad (4.42)$$

kde v_c je **rychlost kontaktní plochy**. Velikost amplitudy výchylky kontaktní plochy (4.39) je s ohledem na tyto počáteční podmínky rovna



Obr. 103 Posuv kontaktní plochy po zavedení deformovaného objemu

$$V_{def} = A_B x_{max} = \pi D^2 x_{max} / 4 \text{ [experimentální data]}$$

$$x_B(t) = \frac{v_c}{\omega_B} e^{-\gamma_B t} \sin(\omega_B t), \quad x_p(t) = \frac{v_c}{\omega_p} e^{-\gamma_p t} \sin(\omega_p t) \quad (4.43)$$

Předpokládali jsme, že při dopadu jsou pohyby tělesa a projektilu stejné, jde o kontaktní plochu, viz obrázek č. 103. Porovnáním vztahu (4.43) se vztahem (4.39) (kde $x_0 = x_{max}$) je zřejmé, že $v_c = \omega_B x_{max}$, kde x_{max} je určena vztahem (4.23) a frekvence ω_B může být určena na základě výpočtu interakce projektilu se štítem, viz vztah (4.50) a nebo experimentálně, viz. obrázek č. 95 a nebo

Derivací (4.43) dostáváme rychlost výchylky

$$v_B(t) = v_c e^{-\gamma_B t} \left[\cos(\omega_B t) - \frac{\gamma_B}{\omega_B} \sin(\omega_B t) \right], \quad v_p(t) = v_c e^{-\gamma_p t} \left[\cos(\omega_p t) - \frac{\gamma_p}{\omega_p} \sin(\omega_p t) \right] \quad (4.44)$$

Její maximální hodnota je v čase dopadu $t=0$ a je rovna $v_c = \omega_B x_{\max}$. Zrychlení kontaktní plochy je určeno jako časová derivace rychlosti

$$\dot{v}_B = -v_c \omega_B e^{-\gamma_B t} \left\{ \left[1 - \left(\frac{\gamma_B}{\omega_B} \right)^2 \right] \sin(\omega_B t) + \frac{2\gamma_B}{\omega_B} \cos(\omega_B t) \right\} \quad (4.45)$$

a jeho maximální hodnota nastává v čase $t = \pi / (2\omega_B)$ a jeho maximální hodnota je

$\dot{v}_{B\max} = -v_c \omega_B$. Veličina $\frac{\gamma_B}{\omega_B}$ se obvykle blíží nule, viz experimentální hodnotu

$$\gamma_B / \omega_B = 1.45 \cdot 10^{-4} / 120 = 1.21 \cdot 10^{-6}.$$

Vypočteme hodnoty potřebných parametrů pro podmínky experimentu. Tudiž

$$E_B = \frac{A_B E_B}{L_0} - A_p \tilde{E}_c = \frac{A_B \cdot 2.77 \cdot 10^9}{0.364} - A_p \cdot 7.61 \cdot 10^9 = (A_B - A_p) \cdot 7.61 \cdot 10^9 \quad (4.46)$$

$$E_p = A_p \left(\frac{E_p}{l_{p0}} - \tilde{E} \right) = A_p \left(\frac{14 \cdot 10^9}{0.0399} - 7.61 \cdot 10^9 \right) = A_p \cdot 343 \cdot 10^9$$

$$M_B = \frac{A_B \mu_B}{L_0} - A_p \tilde{\mu}_c = \frac{A_B \cdot 56}{0.364} - A_p \cdot 122 = (A_B - A_p) \cdot 153, \quad (4.47)$$

$$M_p = A_p \left(\frac{\mu_p}{l_{p0}} - \tilde{\mu}_c \right) = A_p \cdot \left(\frac{10^7}{0.0399} - 153 \right) = A_p \cdot 25.1 \cdot 10^7$$

Stanovíme frekvence podle vztahu (4.41) a tlumení

$$\begin{aligned} \omega_B &= \sqrt{\frac{E_B}{m_B} - \left(\frac{M_B}{2m_B} \right)^2} = \sqrt{\frac{(A_B - A_p) \cdot 7.61 \cdot 10^9}{75} - \left[\frac{(A_B - A_p) \cdot 153}{75} \right]^2} \\ &= \sqrt{79.6 \cdot 10^6 (D^2 - d_p^2)} = 8921 \cdot \sqrt{(D^2 - d_p^2)}, \\ \gamma_B &= \frac{M_B}{2m_B} = \frac{(A_B - A_p) \cdot 153}{2 \cdot 75} = 1.02 \cdot (A_B - A_p) = 0.80 \cdot (D^2 - d_p^2), \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{E_p}{m_p} - \left(\frac{M_p}{2m_p}\right)^2} = \sqrt{\frac{A_p \cdot 343 \cdot 10^9}{0.0153} - \left(\frac{A_p \cdot 25.1 \cdot 10^7}{2 \cdot 0.0153}\right)^2}$$

$$= d_p \sqrt{17.6 \cdot 10^{12} - 41.5 \cdot 10^{18} d_p^2} \approx i6.4 \cdot 10^9 \cdot d_p^2 \text{ pro } d_p < 10 \text{ mm} \quad (4.49)$$

$$\gamma_p = \frac{M_p}{2m_p} = \frac{A_p \cdot 25.1 \cdot 10^7}{2 \cdot 0.0153} = 6.44 \cdot 10^8 d_p^2,$$

$$\text{s ohledem na imag. část } \omega_p \text{ je } \gamma_p = (6.4 \cdot +0.644) \cdot 10^9 d_p^2 = 7.044 \cdot 10^9 d_p^2$$

Ze vztahu (4.49) plyne, že za uvedených podmínek kdy je ω_p imaginární nedochází v tělese projektilu k žádným pulzacím. Projektil se pouze deformuje.

Frekvence pulzací v tělese (4.48) závisí na $\sqrt{(D^2 - d_p^2)} = d_p \sqrt{r^2 - 1}$ kde jsme volili **průměr deformovaného objemu** (v balistické vestě) $D = r d_p$, tj. **r-tý násobek průměru projektilu**. Např. pro $r = 2$ dostáváme $\omega_B = 8921 \cdot \sqrt{(D^2 - d_p^2)} = 8921 \cdot 0.00879 \cdot \sqrt{3} = 136 \text{ s}^{-1}$.

Porovnej s odpovídající křivkou na *obrázek č. 102*. V experimentu na *obrázek č. 96* byla naměřena hodnota $\omega_B = 120 \text{ s}^{-1}$, což odpovídá

$$r = \sqrt{1 + \frac{120}{8921 \cdot d_p}} = 1.59 \quad (4.50)$$

Rychlost útlumu podélné vlny (4.43) stanovíme z hodnoty

$$\gamma_B = 0.80 \cdot d_p^2 (r^2 - 1) = 0.80 \cdot 0.00879^2 \cdot (1.83^2 - 1) = 1.45 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \quad (4.51)$$

Tudíž **podélná deformace (výchylka) tělesa se prakticky netlumí**, pokles na e^{-1} by trval hodiny. Tento útlum odpovídá malým výchyvkám. V reálném případě se tělesem **šíří vlna konečné amplitudy**, která vykazuje **nelineární chování** a tlumí se mnohem rychleji, viz *kapitola 16.6*.

Ze vztahu pro výchylku kontaktní plochy (4.43) můžeme vypočítat amplitudu rychlosti této výchyvky

$$v_c = v_B = \omega_B x_{\max} = 120 \cdot 0.068 = 8.16 \text{ m/s} \quad (4.52)$$

která se velmi blíží naměřené rychlosti $v_{0\max} = u_{0x} \omega = \frac{2\pi \cdot 0.069}{4 \cdot 0.013} = 8.3 \text{ m/s}$. V reálném případě bude $v_c \geq v_B$, protože dochází k určitému zbrzdění při podélné deformaci štítu o tloušťce s .

Časový průběh zrychlení (zpomalení) (4.45) na kontaktní ploše je

$$\begin{aligned}\dot{v}_B &= -v_c \omega_B \sin(\omega_B t), \\ \dot{v}_{B\max} &= -v_c \omega_B = -8.16 \cdot 120 = -989 \text{ ms}^{-2} \approx -100 \text{ g}\end{aligned}\quad (4.53)$$

Znaménko "-" určuje, jde o zbrzdění. Zbrzdění za balistickou vestou nikdy nedosáhne maximální hodnoty, protože po určitém čase

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{120} = 8.3 \text{ ms} \quad (4.54)$$

dochází díky nelinearitě při šíření rychlostní vlny k její deformaci, viz. (0.26) a obrázek č. 109.

16.6 Šíření deformační vlny od místa kontaktu

Jak je patrné z obrázku č. 101 postupuje deformační vlna jednak jako vlna rovinná ve směru nárazu a jednak jako vlna osově symetrická šířící se ve směru kolmém. Výsledkem je šikmá vlna, která zasáhne i oblasti mimo směr nárazu, viz obrázek č. 104. Vzniká tak kuželová deformační vlna s vrcholovým úhlem 2φ . Velikost tohoto úhlu určíme ze vztahu

$$\varphi = \arctg\left(\frac{D}{2x_{\max}}\right) \quad (4.55)$$

Rychlost kuželové deformační vlny je

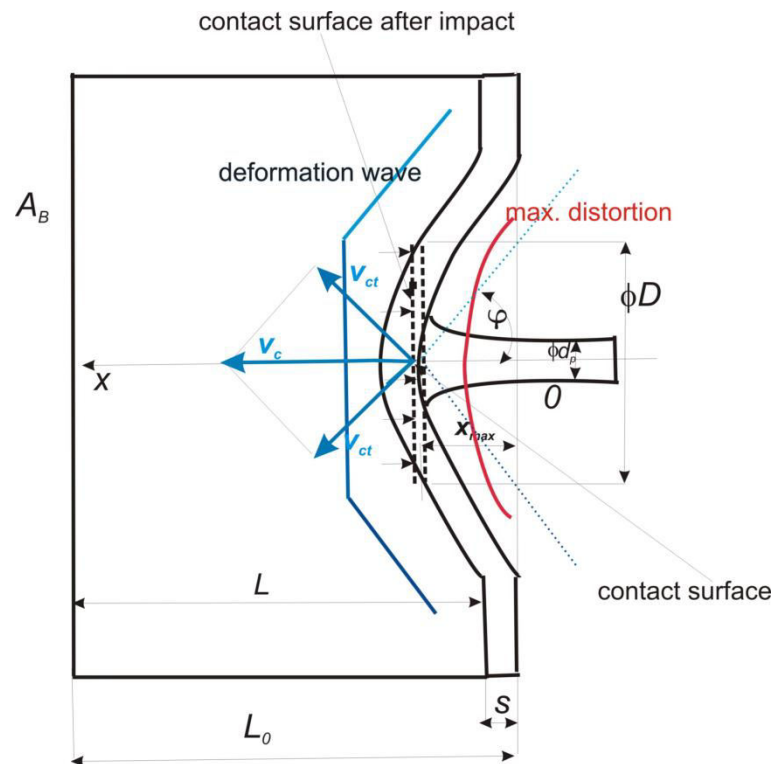
$$v_{ct} = v_c \sin \varphi = \omega_B x_{\max} \sin \varphi = v_c \sin \left[\arctg\left(\frac{D}{2x_{\max}}\right) \right] = \frac{v_c D}{\sqrt{4x_{\max}^2 + D^2}} \quad (4.56)$$

Tudíž ze znalosti rychlosti kontaktní plochy v_c (je větší nebo rovna, v případě malé tloušťky štítu a jeho malé podélné deformaci, rychlosti na okraji tělesa v_B), viz (4.52). Rozměr D určující průměr efektivní deformace stanovíme ze vztahu (4.31).

Hodnoty zrychlení na kuželové ploše stanovíme ze vztahu

$$\dot{v}_{Bt,\max} = -v_{ct} \omega_B = -\omega_B^2 x_{\max} \sin \varphi = -\frac{\omega_B^2 x_{\max} D}{\sqrt{4x_{\max}^2 + D^2}} \quad (4.57)$$

který je analogický vztahu (4.53) pro zrychlení ve směru dopadu projektilu. Z těchto vztahů je patrné, že značný význam má velikost D , jejíž hodnota závisí na velikosti elastického modulu ochranného štítu.



Obr. 104 Deformační vlna se v prostoru pod ochranným štítem šíří i do směru kolmého na směr dopadu projektilu [experimentální data]

Pro testovaný případ je $x_{\max} = 68 \text{ mm}$ a $D = 2d_p = 1.6 \cdot 8.8 = 14.1 \text{ mm}$ dává vztah (4.56) hodnotu $v_{ct} = \frac{v_c D}{\sqrt{4x_{\max}^2 + D^2}} = \frac{113.9}{136.05} = 0.84 \text{ m/s}$. Zrychlení na kuželové ploše je podle (4.57) 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.

16.7 Šíření deformačních a napět'ových vln ve viskoelastickém tělese

Budeme vyšetřovat šíření vln konečné amplitudy v 1D přiblížení. Vlna bude generována dopadem projektilu na kvádr viskoelastického materiálu, viz *obrázek č. 89*. Vliv gravitace zanedbáme.

Vydeme z bilance hybnosti (1.25) do které dosadíme za zrychlení v bodě (x, t) z rovnice (1.17) a pro elastické deformace tenzor napětí (1.13) a pro viskózní tečení tenzor (1.20). Konečný tvar pohybové rovnice pro šíření podélných vln konečné amplitudy ve směru osy x má tvar

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} = \frac{\partial t_{xx}}{\partial x} = E \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial x} + E\gamma \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2\mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} \right), \quad (5.1)$$

$$\text{pro } \gamma = \frac{(1+2\sigma^2)(1-5\sigma)}{6(1+\sigma)(1-2\sigma)} \Big|_{\sigma=1/3} = -\frac{22}{72} = -0.305$$

Řešení této nelineární rovnice budeme hledat ve tvaru harmonické vlny

$$u_x(x, t) = u_{0x} e^{i(k_x x - \omega t)} \quad (5.2)$$

s amplitudou u_{0x} , vlnovým vektorem $k_x = \frac{2\pi}{l_x}$ a úhlovou frekvencí ω . Za těchto předpokladů mají jednotlivé parciální derivace tvar

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = -i\omega u_x, \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} = ik_x u_x, \quad \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = -\omega^2 u_x, \quad \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = -k_x^2 u_x, \quad \frac{\partial^2 u_x}{\partial t \partial x} = \omega k_x u_x, \quad (5.3)$$

Dosazením (5.3) do rovnice (5.1), dostáváme disperzní rovnici pro podélné vlny konečné amplitudy

$$\left(-\omega^2 + c_l^2 k_x^2 - i2\nu\omega k_x^2 - i\omega^2 k_x u_x + i2\gamma c_l^2 k_x^3 u_x \right) u_x = 0, \quad \text{pro } c_l^2 = \frac{E}{\rho}, \quad \nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.4)$$

Označili jsme c_l rychlost podélných elastických vln a ν kinematickou viskozitu.

Okrajové podmínky:

Předpokládejme výchylku jen ve směru osy x , tj. $\mathbf{u} = (u_x(x, t), 0, 0)$. V místě dopadu projektilu $x = 0, t = 0$ platí podmínky

$$u_x(0, 0) = u_{0x} \sin(k_x x - \omega t) \Big|_{x=0, t=0} = u_{0x}, \quad (5.5)$$

a na druhém konci tyče délky $L = 35$ cm předpokládáme pevný povrch, tj., uzel vlny

$$u_x(L, t) = 0, \quad \text{pro } t \geq 0 \quad (5.6)$$

Počáteční podmínky musí být kompatibilní s okrajovými podmínkami, tj.

$$u_x(x, t = 0) = 0 \text{ pro } x \in \langle 0, L \rangle \quad (5.7)$$

Odhadneme velikost jednotlivých členů v rovnici (5.1). Budeme předpokládat harmonickou poruchu (5.2) a rovnici (5.4) linearizujeme tak, že neznámou funkci $u_x(x, t) = u_{0x}$ nahradíme pouze její amplitudou

$$\left(-\omega^2 + c_l^2 k_x^2 - i2\nu\omega k_x^2 - i\omega^2 k_x u_{0x} + i2\gamma c_l^2 k_x^3 u_{0x}\right) u_x = 0, \text{ pro } c_l^2 = \frac{E}{\rho}, \nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.8)$$

Po úpravě má dispersní rovnice tvar

$$\omega^2 - \underbrace{c_l^2 k_x^2}_{\text{zvukové vlny}} + i \left(\underbrace{\omega^2 \delta}_{\text{konvekce}} + \underbrace{2\nu\omega k_x^2}_{\text{viskózní tlumení}} - \underbrace{2\gamma c_l^2 k_x^3 \delta}_{\text{konečná deformace}} \right) = 0 \text{ pro } \delta = k_x u_{0x} \quad (5.9)$$

Odhadneme velikost jednotlivých členů pro konkrétní případ na *obrázku č. 95* a *obrázku č. 96*.

Reálné hodnoty jednotlivých parametrů v bodě $x_1 = 3 \text{ cm}$ jsou:

- maximální výchylka $u_{x1}(x = 3 \text{ cm}) = 0.04 \text{ m}$, $u_{0x}(x = 0) = 0.069 \text{ m}$
- maximální rychlost $v_{x1} = 3 \text{ m/s}$
- perioda poruchy $\tau = 4 \cdot 0.013 = 0.052 \text{ s}$ a odpovídající frekvence $\omega = 2\pi/\tau = 120 \text{ s}^{-1}$, pro $\tau/4 = 0.013 \text{ s}$.
- vlnový vektor (číslo) je $k_x = \omega/v_{x1} = 2\pi/l_x = 2\pi/(4u_{x1}) = 6.28/(4 \cdot 0.04) \approx 40 \text{ m}^{-1}$, $\delta = k_x u_{0x} = 40 \cdot 0.069 = 2.76$
- rychlost elastických vln $c_l = 1520 \text{ m s}^{-1}$
- kinematičká viskozita tělesa $\nu = 0.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- elastický koeficient konečných poruch $\gamma = -0.305$

S využitím těchto hodnot budeme analyzovat různé varianty vln.

16.7.1 Šíření slabých deformačních poruch ve viskoelastickém tělese

Dispersní rovnici pro šíření slabých poruch dostaneme zanedbáním členů obsahujících u_x ve vztahu (5.4), popř. položíme-li $\delta = 0$ v dispersní rovnici (5.9)

$$\omega^2 + i2v\omega k_x^2 - c_l^2 k_x^2 = 0 \quad (5.10)$$

Tato kvadratická rovnice pro frekvenci má dva kořeny

$$\omega_{1,2} = \pm k_x \sqrt{c_l^2 - v^2 k_x^2} - i v k_x^2 \quad (5.11)$$

a dosazením do předpokládaného tvaru řešení (5.2) má postupná vlna v kladném směru osy x tvar

$$u_x(x, t) = u_{0x} \exp[i(k_x x - \omega t)] = u_{0x} e^{-vk_x^2 t} \sin\left[k_x \left(x - t \sqrt{c_l^2 - v^2 k_x^2}\right)\right] \quad (5.12)$$

Díky okrajové podmínce (5.7) se realizuje jen 1/4 vlny, takže nejdelší možná vlnová délka poruchy je $l_x = 4L$. Další možná vlnová délka odražené poruchy je $l_x = \frac{3}{4}L$.

Odpovídající vlnový vektor je $k_x = \frac{2\pi}{l_x} = \frac{8\pi}{3 \cdot 0.35} = 24 \text{ m}^{-1}$.

Rychlost postupné vlny (5.12) je

$$c = \frac{x}{t} = c_l \sqrt{1 - \frac{v^2 k_x^2}{c_l^2}} = 1520 \sqrt{1 - \frac{0.04^2 \cdot 24^2}{1520^2}} \approx 1520 \text{ ms}^{-1} \quad (5.13)$$

Maximální výchylka dorazí na konec tělesa za čas $\Delta t_c = 0.35/1520 = 0.24 \text{ ms}$. Tato vlna je i velmi málo tlumena. Na hodnotu $\frac{u_{0x}}{e^2} = 0.135 u_{0x}$ poklesne za čas

$$\Delta t_v = \frac{2}{vk_x^2} = \frac{2}{0.04 \cdot 24^2} = 87 \text{ ms} \quad (5.14)$$

tedy po mnoha (360) odrazech.

16.7.2 Útlum deformační poruchy viskozitou- analytické řešení

Elastické vlny jsou velmi rychlé $c_l = 1520$ m/s (5.13) a v důsledku jejich malé amplitudy neabsorbují takové množství energie jako nelineární konvektivní vlna, která je těsně po nárazu dominantní (0.12). Konvektivní vlna s viskózním tlumením je popsána rovnicí

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} = \frac{4\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} \right), \text{ popř. } \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{4\nu}{3} \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \quad (5.15)$$

Jde o nelineární, tzv. Burgersovu rovnici, kterou lze převést, tzv. Hopfovou- Colenovou transformací

$$v_x(x, t) = -2 \frac{a}{w} \frac{\partial w}{\partial x} = -2a \frac{\partial \ln w}{\partial x} \text{ pro } a = \frac{4\nu}{3} \quad (5.16)$$

na lineární rovnici [4,5]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{4\nu}{3} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5.17)$$

jejíž řešení budeme hledat za podobných podmínek jako u rovnice šíření vln (5.1), tj. ve tvaru harmonické poruchy (5.2).

Řešení transformované rovnice (5.17) předpokládáme ve tvaru postupné vlny

$$w(x, t) = w_0 \exp[i(k_x x - \omega t)] \quad (5.18)$$

a odpovídající dispersní rovnice je dána vztahem

$$i\omega = ak_x^2, \text{ nebo-li } k_x = \sqrt{\frac{\omega}{a}} \sqrt{i} = \sqrt{\frac{\omega}{a}} \exp\left(i \frac{\pi}{4}\right) = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} (1+i) \quad (5.19)$$

Po dosazení do předpokládaného řešení (5.18) platí

$$w(x, t) = w_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right) \exp i \left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \omega t \right) \rightarrow w_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right) \cos\left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \omega t\right) \quad (5.20)$$

Dosazením tohoto řešení do transformace (5.16) dostáváme rychlost šíření rychlostní poruchy. Derivace (5.20) je

$$\frac{\partial w}{\partial x} = -w_0 \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right) \left[\cos\left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \omega t\right) + \sin\left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \omega t\right) \right] \quad (5.21)$$

a s ohledem na transformaci (5.16) obdržíme konečný vztah pro rychlostní pole

$$\begin{aligned} v_x(x, t) &= -2 \frac{a}{w} \frac{\partial w}{\partial x} = \sqrt{2a\omega} \left[1 + \operatorname{tg} \left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x - \omega t \right) \right] \\ &= v_{0x} \left[1 + \operatorname{tg} \left[\sqrt{\frac{\omega}{2a}} (x - v_{0x} t) \right] \right] = v_{0x} \left[1 + \operatorname{tg} \left[\frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x} t) \right] \right] \quad \text{pro } t \leq 2t_{1\max} \end{aligned} \quad (5.22)$$

které je řešením rovnice (5.15). Jde o šíření postupné vlny při počáteční podmínce

$$v_x(x - v_{0x}t = 0) = v_{0x} \quad (5.23)$$

Srovnej s analýzou šíření vlny konečné amplitudy kapitole 16.8.2., vztah (0.12).

Tudíž při nulové fázi $\eta(x, t) = x - v_{0x}t = 0$ se vlna nedeformuje a postupuje rychlostí v_{0x} . Zde jsme označili amplitudu vlny

$$v_{0x} = \sqrt{2a\omega} = \sqrt{\frac{8v\omega}{3}} = \sqrt{8 \cdot 0.04 \cdot 2 \cdot 3.14 / (3 \cdot 0.052)} = 3.6 \text{ m/s} \quad (5.24)$$

která je charakteristickou rychlostí deformace tělesa za balistickou ochrannou pomůckou. Je určena především velikostí času interakce (frekvencí $\omega = 2\pi/\tau$ určenou vztahem (4.48)) v našem případě $\tau/4 = 0.013\text{s}$ a viskozitou tělesa v .

Z tohoto řešení plyne, že velikost rychlosti závisí na fázi vlny

$$\eta(x, t) = \frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x}t) \in (0, \pi/2) \quad (5.25)$$

a pro

$$\begin{aligned} \frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x}t) &= \frac{\pi}{2}, \text{ tj. } t = \frac{1}{v_{0x}} \left(x - \frac{\pi a}{v_{0x}} \right), \\ x &= \frac{\pi a}{v_{0x}} = \frac{3.14 \cdot 0.04}{3.6} = 0.035 \text{ m pro } t \geq 0 \\ |t| &= \frac{\pi a}{v_{0x}^2} = \frac{3.14 \cdot 0.04}{3.6^2} = 0.0097 \text{ s pro } x = 0 \end{aligned} \quad (5.26)$$

dojde k nárůstu rychlosti $v_x \rightarrow \infty$. Uvedené mezní hodnoty času a vzdálenosti odpovídají jak analýze zestržení v kapitole 16.8.2., viz obrázek č. 109, tak i experimentu na obrázek č. 96.

Obecné řešení (5.22) můžeme využít ke stanovení **charakteristické rychlosti šíření vlny** tělesem (želatinou). Vyjdeme z rychlosti šíření kontaktní plochy (4.52). Charakteristická rychlost v_{0x} stanovená podle vztahu (5.24) je blízká rychlosti postupu kompresní vlny určené experimentem, viz *tabulka č. 23*. je i blízká experimentálnímu údaji v bodě $x_1 = 3 \text{ cm}$ na *obrázku č. 96*, která je $v_{x_1} = 3 \text{ m/s}$.

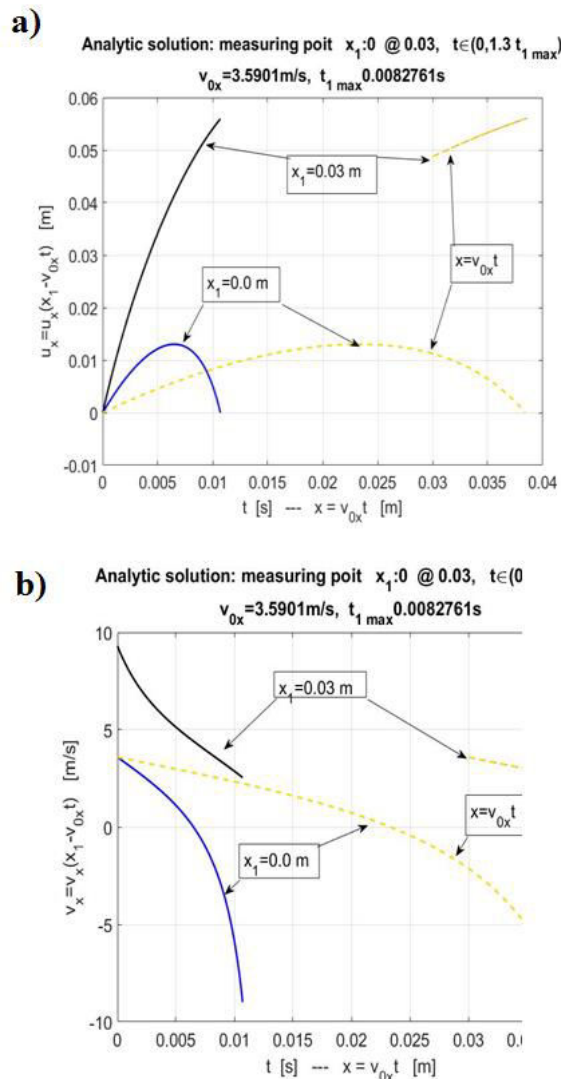
Jestliže využijeme vlastnosti analytického řešení (5.22) můžeme zpětně stanovit počáteční a okrajové podmínky jak pro výchylku tak i rychlost.

Maximum rychlosti $v_{0\text{max}}$ za ochranným štítem vychází podle (4.52) přibližně rovno v_c rychlosti kontaktní plochy a je rovno 8.3 m/s . Díky viskoelastickým vlastnostem štítu se silně tlumí a tělesem se šíří charakteristickou rychlostí (5.24). Rychlost jejího útlumu vypočteme řešením rovnice (5.17) za předpokladu transformace (5.16). Při této formulaci předpokládáme, že se tělesem šíří od okraje $x = 0$ harmonická porucha (5.18).

Integrací (5.22) podle času stanovíme velikost výchylky

$$\begin{aligned}
 u_x(x, t, t_0) &= \int_{t_0}^t v_x(x, \xi) d\xi = v_{0x} \int_{t_0}^t \left[1 + \operatorname{tg} \left[\frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x} \xi) \right] \right] d\xi = \\
 &= v_{0x} (t - t_0) + \frac{2a}{v_{0x}} \left\{ \ln \left[\cos \left[\frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x} t) \right] \right] - \ln \left[\cos \left[\frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x} t_0) \right] \right] \right\} \text{ pro } t \leq 2t_{1\text{max}}
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

Na grafech *obrázcích č. 105* je ukázáno, že bod MID 1 v poloze $x_1 = 3\text{ cm}$ je součástí interakce s projektilem a výchylka a rychlost stanovené podle vztahů (5.27) a (5.22) odpovídají hodnotám v okamžiku interakce.



Obr. 105 Průběh podélné výchylky a podélné rychlosti v bodě $x_1 = 3\text{ cm}$ v čase

$t \in (0, 2t_{1\max})$ vypočtené podle teoretických vztahů (5.27) a (5.22) pro

$$t_{1\max} = \frac{l_x}{2\pi v_{0x}} = \frac{v_{0x} \tau}{2\pi v_{0x}} = \frac{4 \cdot 0.013}{2 \cdot 3.14} = 8.3\text{ ms. Velikosti maximální výchylky a rychlosti}$$

odpovídají hodnotám v oblasti interakce, tj. $v_{0\max} = u_{0x} \omega = \frac{2\pi \cdot 0.069}{4 \cdot 0.013} = 8.3\text{ m/s}$

[experimentální data]

Rychlost $v_{0x} = \sqrt{2a\omega} = \sqrt{2 \cdot 4 \cdot 0.04 \cdot 2 \cdot 3.14 / (3 \cdot 0.052)} = 3.6 \text{ m/s}$ se blíží rychlosti naměřené v bodě $x_1 = 3 \text{ cm}$, viz *obrázek č. 96*.

Plná (modrá) čára je závislost na čase a čárkovaná čára je závislost na poloze. Postupná rychlost deformační vlny je podle experimentu blízká rychlosti 5 m/s, viz *tabulka č. 23*.

Rozdíl mezi velikostí postupné vlny v_{0x} a vycházející z řešení (5.22) a z experimentu, lze vysvětlit existencí grupové rychlosti. Fázová rychlost je rovna

$$c_f = \frac{\omega}{k_x} = \frac{\frac{v_{0x}^2}{2a}}{\frac{v_{0x}}{2a}} = v_{0x} = \sqrt{2a\omega} = 2ak_x = \frac{4\pi a}{l_x} \quad (5.28)$$

a pro krátké vlnové délky narůstá.

Grupová rychlost je vzhledem k závislosti $k_x = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$, viz. (5.22) rovna

$$c_g = \frac{d\omega(k_x)}{dk_x} = \frac{d(2ak_x^2)}{dk_x} = 4ak_x = 2v_{0x} = 2c_f \quad (5.29)$$

a je tudíž dvakrát větší než rychlost fázová. Rychlost postupu energie $c_g = 2v_{0x} = 7.2 \text{ ms}^{-1}$ je vyšší než naměřená rychlost 5 m/s, viz *tabulka č. 23*. Nastává podobná situace jako u vln na volné hladině (kapilární vlny), kde pro krátké vlnové délky ($l_x < 2 \text{ cm}$, pro vodu) je $c_g = 3c_f / 2$. Vlny konečné amplitudy podléhají ve viskoelastickém prostředí disperzi. Protože grupovou rychlostí se přenáší energie je pravděpodobné, že se i maximum deformace pohybuje rychleji, než postupné vlny.

Jak je patrné na *obrázku č. 109* dochází v důsledku zestrnutí mechanické poruchy k nárůstu gradientu rychlosti a tím i díky viskozitě μ k jejímu útlumu. Hustota mechanické energie je

$$t_{xx,dis} = \frac{4\mu}{3} \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad (5.30)$$

a disipovaná mechanická energie (výkon) je vyjádřen vztahem

$$t_{xx,dis} \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{4\mu}{3} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right] \quad (5.31)$$

Vypočteme gradient rychlosti (5.22)

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{v_{0x}^2}{2a \cos^2 \left[\frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x} t) \right]} \quad (5.32)$$

Hustota mechanické energie (5.30) je

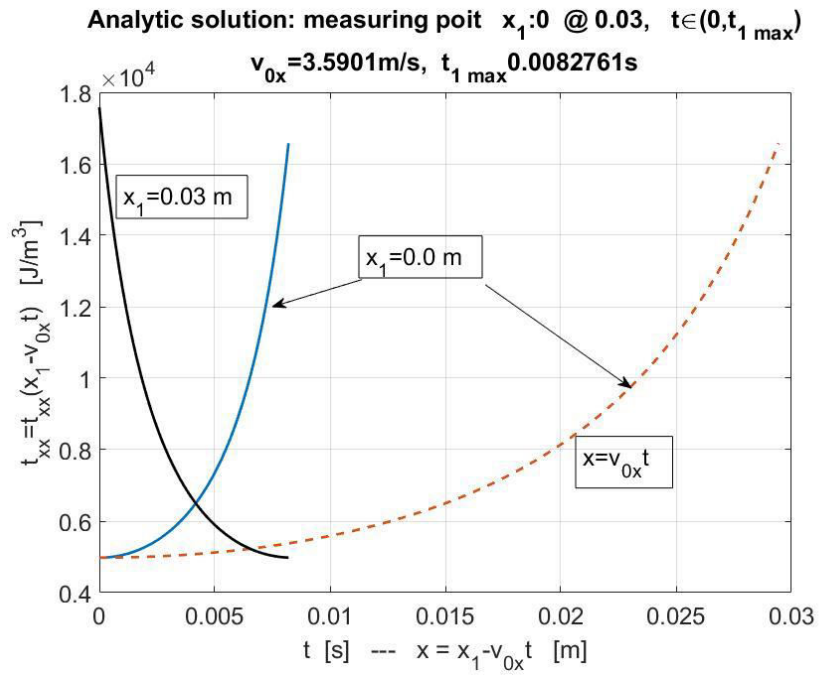
$$t_{xx,dis} = \frac{3\rho v_{0x}^2}{8 \cos^2 \left[\frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x} t) \right]} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{pro } t \leq t_{1\max} \quad (5.33)$$

a disipovaný výkon (5.31)

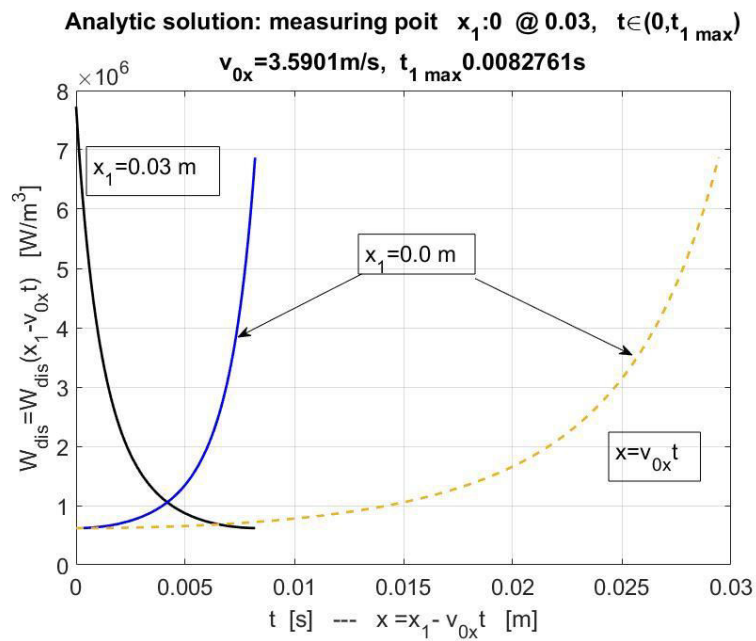
$$t_{xx,dis} \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{9\rho^2 v_{0x}^4}{64\mu \cos^4 \left[\frac{v_{0x}}{2a} (x - v_{0x} t) \right]} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{pro } t \leq t_{1\max} \quad (5.34)$$

Ze vztahu (5.33) plyne, že v tomto přiblížení závisí hustota přenášené mechanické energie na velikosti **charakteristické rychlosti deformace tělesa** $v_{0x} = \sqrt{2a\omega}$ (5.24), která je určena dobou zbrzdění $\tau/4 = 0.013$ s, kde $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ a viskozitou $2a = \frac{8\mu}{3\rho}$. Disipovaný výkon (5.34), viz obrázek č. 107, na viskozitě tělesa závisí.

Z obrázku č. 106 je patrné, že hustota energie dosahuje maxima v okamžiku zestržení poruchy v čase $t_{1\max} = 8.3$ ms. Maximum rychlosti vnímané v bodě $x_1 = 3$ cm v okamžiku dopadu projektilu $t = 0$ je větší a je rovno $v_{0\max} = u_{0x}\omega = 8.3$ m/s, viz obrázek č. 105 b). Tento zdánlivý rozpor vzniká v důsledku pohybu povrchového materiálového bodu z polohy $x = 0$ až do maximální polohy $x = u_{0x} = 0.069$ m. V čase $t_{1\max} = 8.3$ ms je v poloze $x = v_{0x}t_{1\max} = 3.59 \cdot 0.0083 = 0.03$ m, viz obrázek č. 105 a).



Obr. 106 *Hustota mechanické energie po dopadu projektilu Vztah (5.33) [experimentální data]*



Obr. 107 *Hustota disipované energie po dopadu projektilu. Vztah (5.34) [experimentální data].*

16.7.3 Útlum deformační poruchy viskozitou - numerické řešení

Výše uvedené vlastnosti analytického řešení ověříme numerickým řešením rovnice šíření poruch konečné amplitudy (5.15)

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{4\nu}{3} \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \quad (5.35)$$

za počáteční podmínky

$$v_x(x, t=0) = v_{0x} \cos\left(\frac{\pi x}{2u_{0\max}}\right), \quad \text{pro } x \in (0, u_{0\max}) \quad (5.36)$$

$$v_x(x, t=0) = 0, \quad \text{pro } x \in (u_{0\max}, L)$$

Kvůli této počáteční podmínce transformujeme souřadnice

$$t' = t, \quad x' = \frac{\pi x}{2u_{0\max}} \quad (5.37)$$

a rovnice (5.35) má pro rychlost $v_x(x', t')$ tvar

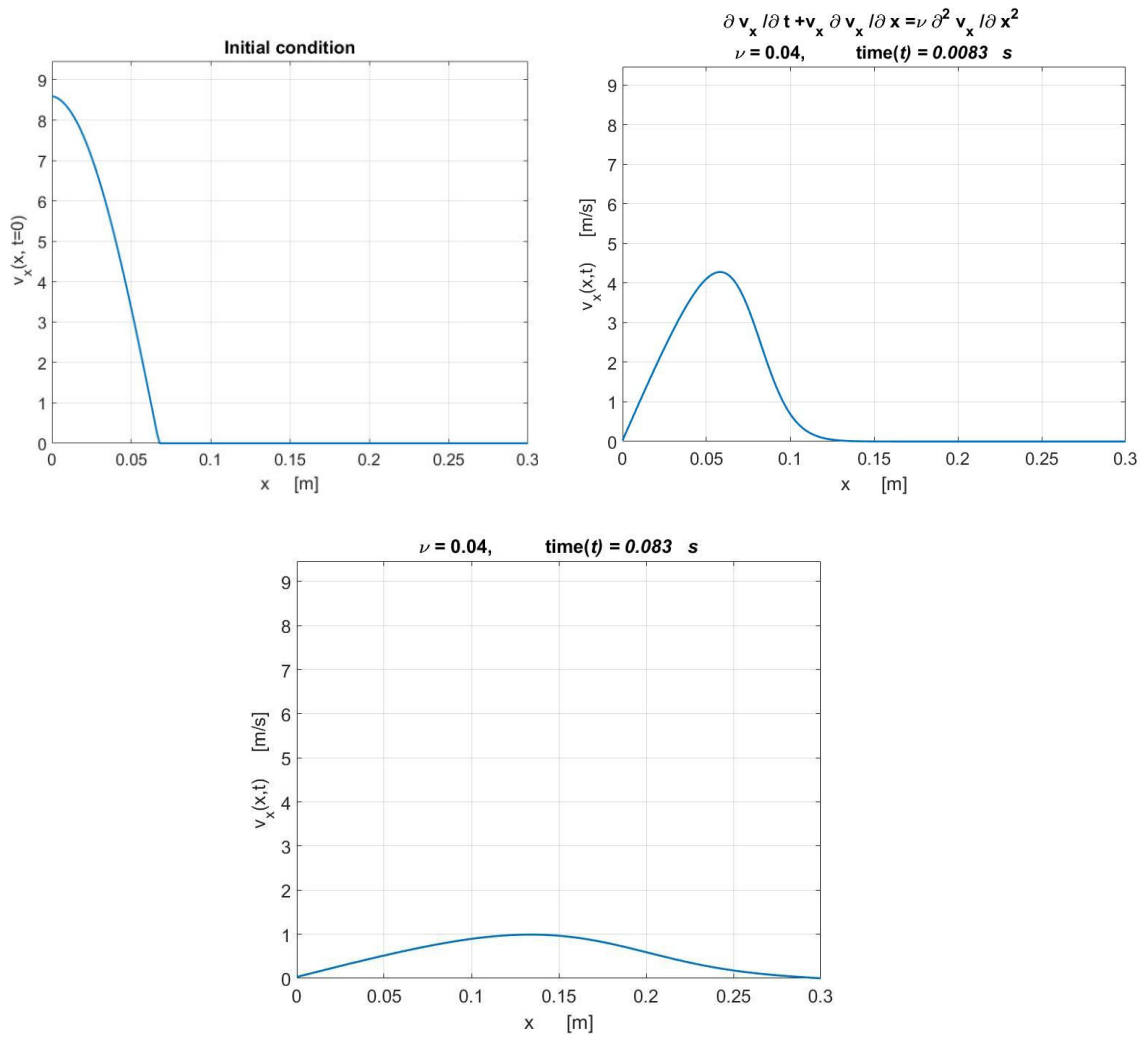
$$\frac{\partial v_x}{\partial t'} + \frac{\pi v_x}{2u_{0\max}} \frac{\partial v_x}{\partial x'} = \frac{4\nu}{3} \left(\frac{\pi}{2u_{0\max}}\right)^2 \frac{\partial^2 v_x}{\partial x'^2}, \quad \text{pro } x' \in \left(0, \frac{\pi L}{2u_{0\max}}\right), t' \geq 0 \quad (5.38)$$

za počáteční podmínky

$$v_x(x', t'=0) = v_{0x} \cos(x'), \quad \text{pro } x' \in (0, \pi/2)$$

$$v_x(x', t'=0) = 0, \quad \text{pro } x' \in \left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi L}{2u_{0\max}}\right) \quad (5.39)$$

Rovnici řešíme Eulerovou explicitní metodou 1. řádu v čase a prostorové derivace aproximujeme metodou konečných diferencí s použitím upwindu pro konvektivní člen. (obrázek. č. 108). Výsledky numerického řešení odpovídají jak kvalitativně (zestřmení poruchy v čase $t_{1\max} = 8.3$ ms, pokles rychlosti se vzdáleností), tak i kvantitativně jak analytickému řešení, tak i experimentu.



Obr. 108 Numerické řešení rychlostní vlny za počáteční podmínky (5.36) do času zestržení $t_{1\max} = 8.3$ ms a času 83ms. Hloubka dutiny $u_{0\max} = 69$ mm
[experimentální data]

16.8 Šíření deformačních poruch konečné amplitudy - linearizovaný konvektivní člen

Pro $\delta = 0$ dostáváme dispersní rovnici malých poruch (5.10) a pro $\gamma = \nu = 0, c_l = 0$ dostáváme dispersní rovnici pro vlny konečné amplitudy v kontinuu

$$\omega = 2\pi/\tau \quad \omega^2(1+i\delta) = 0 \quad \text{pro } \delta = u_{0x}k_x \quad (0.1)$$

Tudíž pro jakoukoliv frekvenci $\omega = 2\pi/\tau$, kde $\tau/4 = 9 \text{ ms}$ je doba pronikání projektilu do ochranné vesty, tj. v bodě $x = 0$, má vlnový vektor tvar

$$i = k_x u_{0x}, \quad k_x = \frac{2\pi}{l_x} = \frac{i}{u_{0x}} \quad (0.2)$$

Předpokládáme, že projektil dopadl v čase $t = 0$ a během času $\tau/4 = 9 \text{ ms}$ dosáhlo prohnutí maxima, tj., $u_x(0, \tau) = u_{0x}$. Dosazením do předpokládaného řešení tvaru (5.2) dostáváme tlumený oscilující pohyb

$$u_x(x, t) = u_{0x} e^{i(k_x x - \omega t)} = u_{0x} e^{-\frac{x}{u_{0x}}} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \quad (0.3)$$

Z tohoto zjednodušeného vztahu pro $u_{0x} = 69 \text{ mm}$ plyne, že ve vzdálenosti $x = 30 \text{ mm}$ poklesne tato amplituda na hodnotu $u_{0x} = 69 \cdot \exp(-30/69) = 44.7 \text{ mm}$. Tato hodnota dobře odpovídá naměřené hodnotě $u_{x1} = 40 \text{ mm}$, viz *obrázek č. 95*. Ve vzdálenosti $x = 180 \text{ mm}$ dává vztah (0.3) hodnotu $u_{x5} = 5 \text{ mm}$. Porovnáním s *obrázkem č. 95* vidíme, že jsou tyto hodnoty nižší, než hodnoty naměřené $u_{x5} = 30 \text{ mm}$. Z těchto důvodů je tato linearizovaná teorie nevhodná.

16.8.1 Šíření deformačních poruch konečné amplitudy - lineární teorie

Dispersní rovnici (5.9) upravíme do tvaru

$$\omega^2(1+i\delta) + i2v\omega k_x^2 - i2\gamma c_l^2 k_x^2 \delta - c_l^2 k_x^2 = 0 \quad \text{pro } \delta = k_x u_{0x} \quad (0.4)$$

a rozřešíme vzhledem k ω . Řešením této kvadratické rovnice v rovině komplexních čísel nalezneme

$$(1-\delta^2)\omega_{1,2} = (1+i\delta)(1-i\delta)(\omega_{re1,2} + i\omega_{im1,2}) = -vk_x^2 \delta \pm \frac{c_l k_x}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{|d|+a} - \delta \sqrt{|d|-a} \right) + i \left[-vk_x^2 \pm \frac{c_l k_x}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{|d|-a} - \delta \sqrt{|d|+a} \right) \right] \quad (0.5)$$

$$\text{pro } |d| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad a = 1 - v^2 \left(\frac{k_x}{c_l} \right)^2 - 2\gamma\delta^2, \quad b = \delta(1+2\gamma)$$

Snadno se přesvědčíme, že pro slabé poruchy, tj. pro $\delta = 0$, dostáváme rovnici (5.11) a pro případ jen konvektivní vlny, tj. $v = \gamma = c_l = 0$ dostáváme rovnici (0.1).

Rovnice (0.5) nám poslouží k odhadu rychlosti šíření, popř. i nárůstu či útlumu postupné vlny (5.2) při konkrétních hodnotách parametrů. Platí

- $a = 1 - v^2 \left(\frac{k_x}{c_l} \right)^2 - 2\gamma\delta^2 = 1 - 0.04^2 \cdot \left(\frac{40}{1520} \right)^2 + 2 \cdot 0.305 \cdot 2.76^2 \square 1 - 2\gamma\delta^2 = 5.65$
- $b = \delta(1+2\gamma) = 2.76 \cdot (1 - 2 \cdot 0.305) = 1.076$
- $|d| = \sqrt{a^2 + b^2} \square \sqrt{1 + \delta^2 + 4\gamma^2\delta^2(1 + \delta^2)} = 5.75$

Rychlost postupné vlny je

$$c_x = \frac{\omega_{re1,2}}{k_x} = -\frac{vk_x\delta}{1-\delta^2} \pm \frac{c_l}{\sqrt{2}(1-\delta^2)} \left(\sqrt{|d|+a} - \delta \sqrt{|d|-a} \right) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (0.6)$$

a její tlumení (zesilování) je dáno vztahem

$$\omega_{im1,2} = -\frac{vk_x^2}{1-\delta^2} \pm \frac{c_l k_x}{\sqrt{2}(1-\delta^2)} \left(\sqrt{|d|-a} - \delta \sqrt{|d|+a} \right) \left[\frac{1}{\text{s}} \right] \quad (0.7)$$

Z těchto vztahů je zřejmé, že vlastnosti vlny silně závisí na její velikosti, tj. na hodnotě $\delta = u_{0x} k_x = 2\pi u_{0x} / l_x$. Rozhodující jsou její počáteční amplituda u_{0x} a vlnová délka l_x . Slabé poruchy, které mají velkou vlnovou délku $l_x \square u_{0x}$ je $\delta < 1$ vlny se chovají jako slabé, viz (5.12).

V našem případě je $\delta \sim 2.76$ se chovají zcela jinak a mají charakter konečných vln s převládajícím vlivem konvektivního členu, viz kapitola 16.8.2.

Pro případ na *obrázek č. 95* platí

$$c_x = -\frac{0.04 \cdot 40 \cdot 2.76}{1 - 2.76^2} \pm \frac{1520}{\sqrt{2}(1 - 2.76^2)} \left(\sqrt{5.75 + 5.65} - 2.76 \sqrt{5.75 - 5.65} \right) = \pm 406 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (0.8)$$

$$\omega_{im1,2} = -\frac{0.04 \cdot 40^2}{1 - 2.76^2} \pm \frac{1520 \cdot 40}{\sqrt{2}(1 - 2.76^2)} \left(\sqrt{5.75 - 5.65} - 2.76 \sqrt{5.75 + 5.65} \right) = \pm 58.5 \cdot 10^3 \left[\frac{1}{\text{s}} \right] \quad (0.9)$$

Jak rychlost vlny tak i její tlumení jsou extrémně vysoké a jsou určeny především experimentem stanovenými parametry procesu, tj. k_x , δ a c_l . Velice malý vliv má viskozita tělesa. Je zajímavé, že rychlost šíření vlny $c_x = 406$ m/s je velmi blízká rychlosti dopadající střely na ochranný štít, která má hodnotu $v_p = 375$ m/s. Jestliže zanedbáme vliv konečných deformací (položíme $\gamma = 0$) nalezneme ze vztahu (0.6) nejmenší možnou rychlost poruchy z podmínky

$$\left(\sqrt{|d| + a} - \delta \sqrt{|d| - a} \right) = \left(\sqrt{2 + \delta^2} - \delta \sqrt{\delta^2} \right) = 0, \text{ nebo-li } \delta = \sqrt{2} = \frac{2\pi u_{0x}}{l_x} \quad (0.10)$$

Dostáváme vztah mezi amplitudou poruchy a její vlnovou délkou. Tato relace nezávisí na materiálových vlastnostech tělesa. Rychlost vlny je pak určena jen viskozitou a vlnovou délkou

$$c_x = -\frac{vk_x \delta}{1 - \delta^2} = -\frac{0.04 \cdot \sqrt{2}}{1 - 2} k_x = \frac{0.355}{l_x} \Big|_{l_x=0.16} = 2.22 \text{ m/s} \quad (0.11)$$

Naměřená maximální rychlost byla $v_{x1} = 3$ m/s, viz *obrázek č. 96*. Souvislost (0.10) může hrát významnou roli při šíření postupné vlny tělesem. Odhadneme ještě útlum na hodnotu $0.02u_{0x} = u_{0x} \exp(-58.5 \cdot 10^3 \Delta t) = u_{0x} \exp(-4)$, což odpovídá časovému intervalu $\Delta t = 7 \cdot 10^{-5}$ s.

Uvedený rozbor ukazuje, že **pro tak silné vlny není aproximace lineární harmonickou vlnou vhodná.**

16.8.2 Šíření deformačních poruch konečné amplitudy - postupná vlna

Soustředíme se na šíření postupné vlny konečné amplitudy, která je popsána nelineární rovnicí

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \frac{\partial u_x}{\partial t} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} = 0, \text{ popř. } \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \text{ pro } v_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} \quad (0.12)$$

Předpokládejme obecnou postupnou vlnu konečné amplitudy ve tvaru

$$v_x(x, t) = v_x(\eta) \text{ kde } \eta = \eta(x, t) \quad (0.13)$$

kde η je fáze vlny. Funkce popisující takovouto vlnu splňuje podmínky

$$\frac{\partial v_x}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \quad d\eta = \frac{\partial \eta}{\partial t} dt + \frac{\partial \eta}{\partial x} dx = 0 \quad (0.14)$$

kde druhá rovnice vyjadřuje podmínku konstantní fáze, tj. při $v_x(\eta = konst) = konst$

Máme dvě rovnice pro dvě neznámé $\frac{\partial \eta}{\partial t}, \frac{\partial \eta}{\partial x}$

$$\begin{bmatrix} 1 & v_x \\ dt & dx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \eta}{\partial t} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (0.15)$$

Nenulové řešení existuje jen v případě, když je determinant soustavy nulový, tj.,

$$\det \begin{bmatrix} 1 & v_x \\ dt & dx \end{bmatrix} = dx - v_x(x, t) dt = 0 \quad (0.16)$$

Pak řešením rovnice (0.15) je funkce $\eta(x, t) = konst$ splňující podmínky

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -v_x(x, t), \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} = 1 \quad (0.17)$$

Konkrétní tvar funkce $\eta(x, t) = konst$ nedokážeme obecně stanovit a omezíme se na její tvar ve vybraných bodech, např. v bodě $\eta(x_1 = 3 \text{ cm}, t_1 = 13 \text{ ms}) = konst$, který odpovídá experimentu v bodě MID 1, viz *obrázek č. 96*.

Rychlost střely dopadající na ochranný štít je $v_p = 375 \text{ m/s}$ a za ním ve vzdálenosti $x_1 = 3 \text{ cm}$ je rovna $v_{x_1} = 3 \text{ m/s}$, viz *obrázek č. 96*. Více jak 100 násobné zpomalení je způsobené jednak materiálovými vlastnostmi štítu tak i absorpcí kinetické energie do materiálu tělesa, viz. (4.52). Jde především o generaci postupné vlny s fází $\eta(x, t) = konst$. Tato fáze má vlastnost totálního diferenciálu

$$d\eta = \frac{\partial \eta}{\partial t} dt + \frac{\partial \eta}{\partial x} dx = v_x dt + 1 \cdot dx = 0 \text{ nebo-li } \frac{\partial v_x(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial \cdot 1}{\partial t} = 0 \quad (0.18)$$

ze které plyne, že rychlost vlny je funkcí jen času, tj., $v_x(x_0, t)$, kde x_0 je nějaký pevný bod v tělese před příchodem vlny, např. body na *obrázek č. 95* $x_0 = x_{01} = 3\text{ cm}$, $x_0 = x_{02} = 10\text{ cm}$, apod.

Do bodu x_1 přišla postupná vlna v čase t_{01} a podobně do ostatních bodů v časech t_{02}, t_{03} , a pod. Za těchto podmínek můžeme předpokládat, že fáze postupující vlny má v nějakém bodě x a čase t obecný tvar

$$\eta(x, t) = x - v_x(x, t)t, \quad (0.19)$$

Nadále budeme předpokládat, 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 $i = 1, 2, 3..$

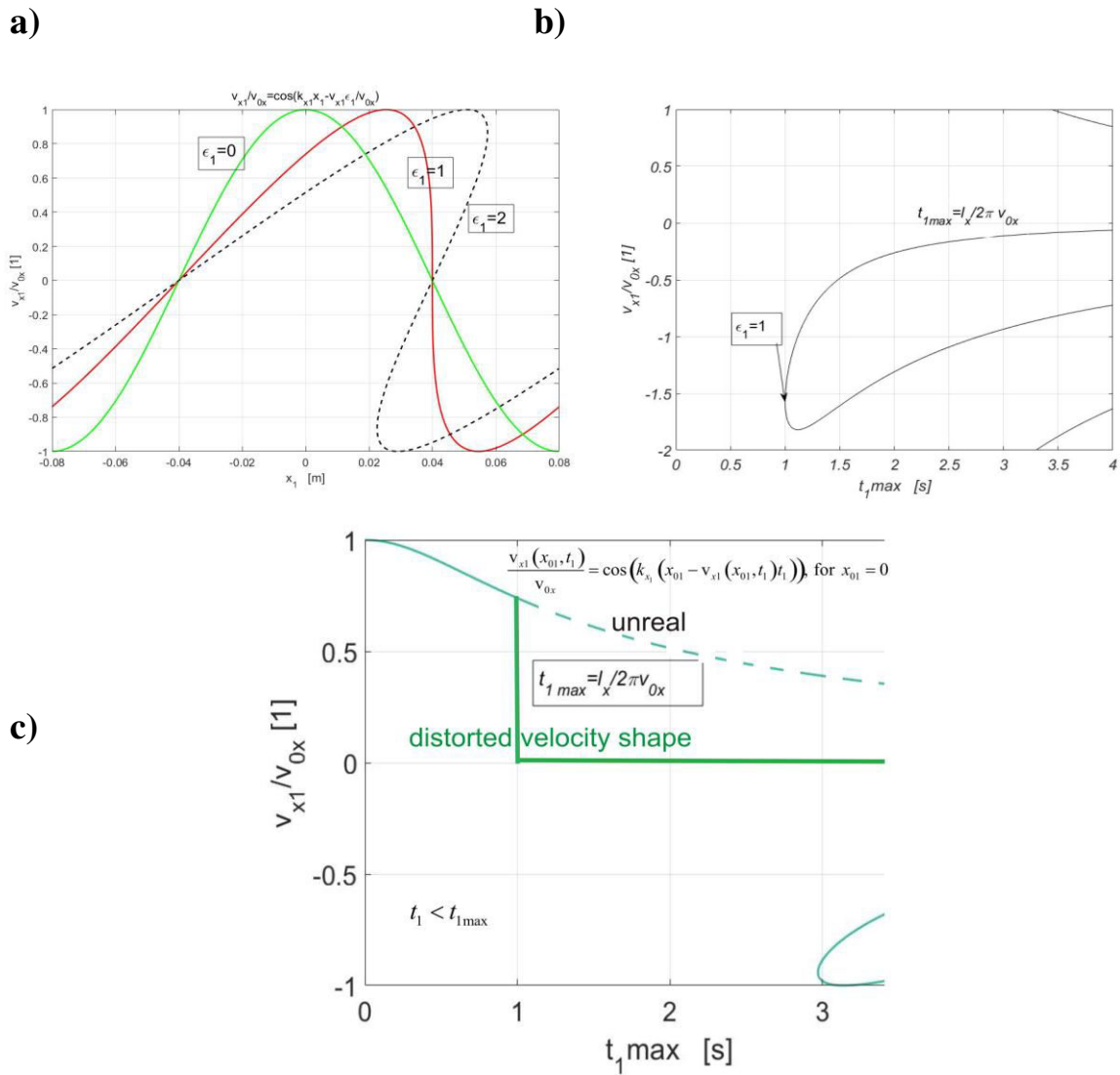
Budeme vyšetřovat rychlost materiálového bodu MID1, který je před příchodem pulsní vlny v poloze $x_{01} = 3\text{ cm}$. Rychlostní pole, které tento bod posunulo ve směru x (směr postupu vlny) je popsáno rovnicí (0.12). Protože podle podmínky (0.18), nezávisí rychlostní pole v pevném geometrickém bodě $x_{01} = 3\text{ cm}$ na souřadnici x , ale jen na čase má harmonická postupná vlna tvar

$$v_{x1}(x_1, t_1) = v_{0x1} \cos\left(k_{x1} (x_1 - v_{x1}(x_1, t_1)t_1)\right), \text{ pro } x_1 = x_{01}, t_1 \geq t_{01} \quad (0.20)$$

viz. Obr. 3.2. Ukážeme, jak se mění tvar vlny (rychlostního pole) v okolí $x_1 \in (x_{01} - l_x/2, x_{01} + l_x/2)$ geometrického $x_{01} = 3\text{ cm} = \text{konst}$ v závislosti na čase a jak mění tvar vlny v právě v tomto bodě v průběhu času $t_1 \geq t_{01}$, viz *obrázek č. 109*. Vztah (0.20) upravíme

$$\begin{aligned} \frac{v_{x1}}{v_{0x1}} &= \cos\left(k_{x1} (x_1 - x_{01}) - \frac{v_{x1}}{v_{0x1}} v_{0x1} k_{x1} t_1\right) \\ &= \cos\left(k_{x1} (x_1 - x_{01}) - \frac{v_{x1}}{v_{0x1}} \varepsilon_1(t_1)\right) \text{ pro } \varepsilon_1(t_1) = v_{0x1} k_{x1} t_1 \end{aligned} \quad (0.21)$$

a parametr $\varepsilon_1(t_1)$ nazýváme parametrem zestrmení. Maximální hodnotu parametru zestrmení stanovíme z podmínky neexistence derivace rychlostního pole (0.21) v bodě $x_{01} = 3\text{ cm} = \text{konst}$. Tudíž



Obr. 109 Vývoj pulzu rychlostního pole v bodě MID1 po dopadu projektilu [experimentální data]

a) Zestrmení harmonické poruchy (0.21) v důsledku parametru $\epsilon_1(t_1)$, který narůstá s časem.

b) Podmínka zestrmení nastává pro v čase $t_{1max} = \frac{l_x}{2\pi v_{0x}} = \frac{v_{0x} \tau}{2\pi v_{0x}} = \frac{4 \cdot 0.013}{2 \cdot 3.14} = 8.3 \text{ ms}$,

srovnej s Obr. 3.1 a Obr. 3.2, pro $x_{01} = 3 \text{ cm}$ - modrá čára.

c) Průběh rychlosti, tak jak je vnímán v poloze x_{01} . V čase $t_1 \leq t_{1max}$ dochází k poklesu rychlosti a v čase $t_1 > t_{1max}$ rychlost poklesne v důsledku disipace (viskozity) k nule, viz dál

$$w'(t_1) = -\sin(w(t_1)\varepsilon_1(t_1)) [w'(t_1)\varepsilon_1(t_1) + w(t_1)\varepsilon_1'(t_1)]$$

$$\text{pro } w = \frac{v_{x1}(x_{01}, t_1)}{v_{0x1}}, \frac{dw}{dt_1} = w'(t_1) \quad (0.22)$$

a po úpravě

$$w'(t_1) = -\frac{w(t_1)\varepsilon_1'(t_1)\sin(w(t_1)\varepsilon_1(t_1))}{1 + \varepsilon_1(t_1)\sin(w(t_1)\varepsilon_1(t_1))} \rightarrow \infty \quad (0.23)$$

Tudíž pro čas t_1 vyhovující rovnici

$$\varepsilon_1(t_1) = -\frac{1}{\sin(w(t_1)\varepsilon_1(t_1))} \quad (0.24)$$

Na *obrázku č. 109* je patrné, že podmínka (0.24) je splněna pro

$$\varepsilon_1(t_1) = v_{0x1}k_{x_1}t_{1\max} = 1, \text{ tj. } w = \frac{v_{x1}(x_{01}, t_1)}{v_{0x1}} = -\frac{\pi}{2} \quad (0.25)$$

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, viz *obrázek č. 109 b*). V důsledku viskozity nemůže tento stav nastat. Podmínku zestrnění $\varepsilon_1(t_1) = v_{0x1}k_{x_1}t_{1\max} = 1$, můžeme upravit pro postupnou vlnu (0.20), jejíž fáze je $\omega t - k_x x = 0$

$$\omega = \frac{k_x x}{t} = k_x v_{0x1} = \frac{k_x v_{0x1} t}{t} = \frac{1}{t_{1\max}}, \text{ nebo } t_{1\max} = \frac{1}{v_{0x} k_x} = \frac{l_x}{2\pi v_{0x}} = \frac{1}{\omega} \quad (0.26)$$

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

16.9 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. 25 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 (*kapitola 1.1*). mohou obecně záviset na velikosti deformace.

K simulaci účinků střel na živou tkáň bylo vyrobeno experimentální zařízení s pohyblivou podložkou (*obrázek č. 90*), 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**.

Projektíl dopadající do balistické vesty zachytí jen část kinetické energie. Zbytek této energie se přenesl 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 δV . 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 (4.52). 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 pětivrstevný 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 tkáň 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 tkáň (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. 25*). 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*), viz *obrázek č. 101*.

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 (5.13) a v důsledku jejich malé amplitudy neabsorbují takové množství energie jako nelineární konvektivní vlna, která je těsně po nárazu dominantní (0.12).

Konkrétní tvar funkce $\eta(x, t) = \text{konst}$ nedokážeme obecně stanovit a omezíme se na její tvar ve vybraných bodech, např. v bodě $\eta(x_1 = 3 \text{ cm}, t_1 = 13 \text{ ms}) = \text{konst}$, který odpovídá experimentu v bodě MID 1, viz *obrázek č. 96*. Budeme vyšetřovat rychlost materiálového bodu MID1, který je před příchodem deformační vlny.

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, viz. (4.52) a podobněji v kapitole 16.8.2.

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 $\omega = 2\pi / \tau$ určenou vztahem (4.48)) v našem případě $\tau / 4 = 0.013$ s a viskozitou tělesa v .

Uvedené mezní hodnoty času a vzdálenosti odpovídají jak analýze zestržení v kapitole 16.8.2, *obrázek č. 109*, tak i experimentu na *obrázku č. 96*.

Obecné řešení (5.22) můžeme využít ke stanovení charakteristické rychlosti šíření vlny tělesem (BG). Maximum rychlosti $v_{0\max}$ za ochranným štítem vypočteme podle vztahu (4.52) 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.

Rychlostní pole, které tento bod posunulo ve směru x (směr postupu vlny) je popsané rovnicí (0.12). Protože podle podmínky (0.18), nezávisí rychlostní pole v pevném geometrickém bodě $x_{01} = 3\text{cm}$ na souřadnici x , ale jen na čase, má harmonická postupná vlna rychlost (0.20). Úpravou dostáváme vztah pro časovou změnu rychlosti v daném geometrickém bodě x_{01}

$$\begin{aligned} \frac{v_{x1}}{v_{0x1}} &= \cos\left(k_{x_1}(x_1 - x_{01}) - \frac{v_{x1}}{v_{0x1}} v_{0x1} k_{x_1} t_1\right) \\ &= \cos\left(k_{x_1}(x_1 - x_{01}) - \frac{v_{x1}}{v_{0x1}} \varepsilon_1(t_1)\right) \text{ pro } \varepsilon_1(t_1) = v_{0x1} k_{x_1} t_1 \end{aligned}$$

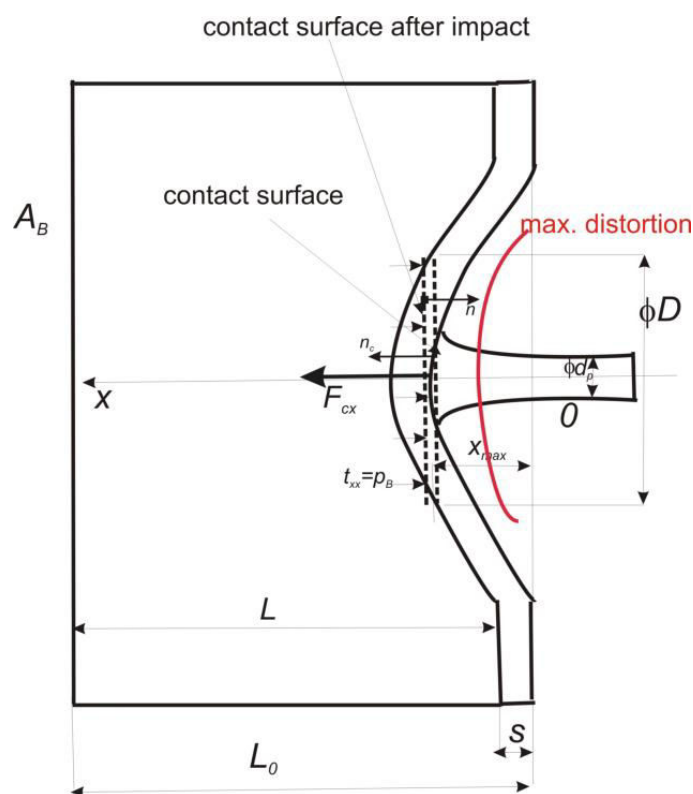
Parametr $\varepsilon_1(t_1)$ nazýváme **parametrem zestrmení**. Maximální hodnotu parametru zestrmení stanovíme z podmínky neexistence derivace rychlostního pole (0.21) v bodě $x_{01} = 3\text{cm} = \text{konst}$.

16.10 Dílčí shrnutí

Při daných geometrických rozměrech a materiálových vlastnostech balistické ochranné pomůcky, projektilu a chráněného tělesa (v našem případě balistické želatiny Ž-10), viz *tabulka č. 24* je rozhodující kinetická energie projektilu určená vztahem (4.16). 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)**

$$x_{\max} = \frac{v_p}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{\tilde{\mu}_c}{\tilde{E}_c} \right)^2 + \frac{16m_p}{\pi d_p^2 \tilde{E}_c}} - \frac{\tilde{\mu}_c}{\tilde{E}_c} \right] \square \frac{v_p}{2} \sqrt{\frac{16m_p}{\pi d_p^2 \tilde{E}_c}} = \frac{375}{2} \sqrt{1.33 \cdot 10^{-7}} = 68 \text{ mm} \quad (0.27)$$

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. 95*.



Obr. 110 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 (4.13), tj.,

$$\tilde{E}_c = E_c \frac{(E_p L_0 + E_B l_{p0})}{E_p L_0 (L_0 + l_{p0})}, \text{ kde } E_c = \frac{E_B E_p (L_0 + l_{p0})}{L_0 E_p + l_{p0} E_B}, E_B = \frac{E_s E_{ps} (L + s)}{L E_p + s E_s} \quad (0.28)$$

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_s 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 (4.41) platí

$$\omega_B = \sqrt{\frac{E_B}{m_B}} = \sqrt{\frac{(A_B - A_p) \cdot 7.61 \cdot 10^9}{75}} = \sqrt{79.6 \cdot 10^6 (D^2 - d_p^2)} = 8921 \cdot \sqrt{(D^2 - d_p^2)}, \quad (0.29)$$

Vliv členů obsahující viskozitu tělesa a projektilu jsou pro výpočet frekvence ω_B zanedbatelné. Materiálové parametry E_B, M_B jsou definovány zjednodušenými vztahy (4.37) a (4.38), tj.

$$E_B = \frac{A_B E_B}{L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c = \frac{\pi D^2 E_B}{4 L_0} - \frac{\pi d_p^2}{4} \tilde{E}_c, \quad (0.30)$$

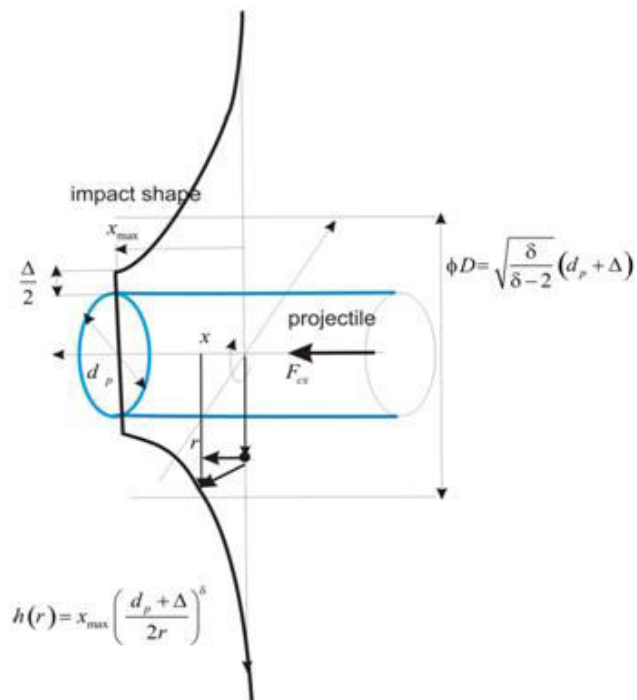
kde použité elastické moduly E_B, E_p jsou stejné jako při výpočtu průniku x_{\max} .

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

$$h(r) = x_{\max} \left(\frac{d_p + \Delta}{2r} \right)^\delta \quad \text{pro } r \geq \frac{d_p + \Delta}{2} \quad (0.31)$$

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

$$V_{def} = \pi \int_0^{x_{\max}} r^2 dx = \pi \frac{(d_p + \Delta)^2}{4} x_{\max}^{2/\delta} \int_0^{x_{\max}} \frac{dx}{x^{2/\delta}} = \pi \frac{\delta (d_p + \Delta)^2 x_{\max}}{4(\delta - 2)} \quad (0.32)$$



Obr. 111 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 naitovány podle experimentu tak aby $\omega_B = 120 \text{ s}^{-1}$, viz Obr. 3.2. Ze vztahu (0.29) 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 (4.44) v okamžiku dopadu $t = 0$ je rovna

$$v_c = \omega_B x_{max} = 120 \cdot 0.068 = 8.16 \text{ m/s} \quad (0.33)$$

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

$$\dot{v}_B \square -v_c \omega_B \sin(\omega_B t) \Big|_{t=t_{max}} = -v_c \omega_B \sin(1) = -8.16 \cdot 120 \cdot 0.841 = 823 \text{ ms}^{-2} = 84g \quad (0.34)$$

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

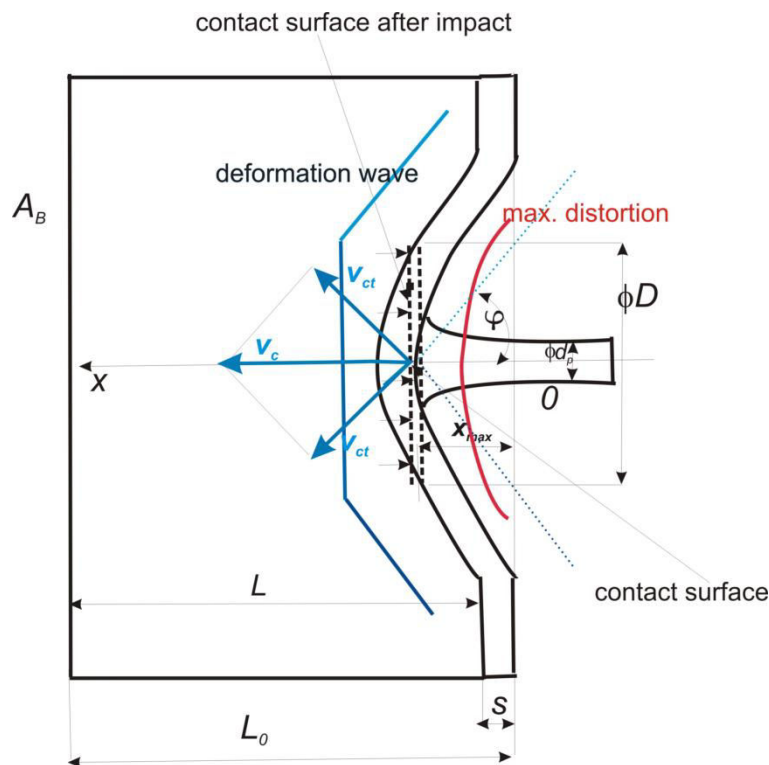
$$x_{\text{distor}} = x_{\max} \sin(1) = 0.069 \cdot 0.841 = 0.058 \text{ m} = 58 \text{ mm}$$

viz **červená čára (max. distortion)** na obrázku č. 110. 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.



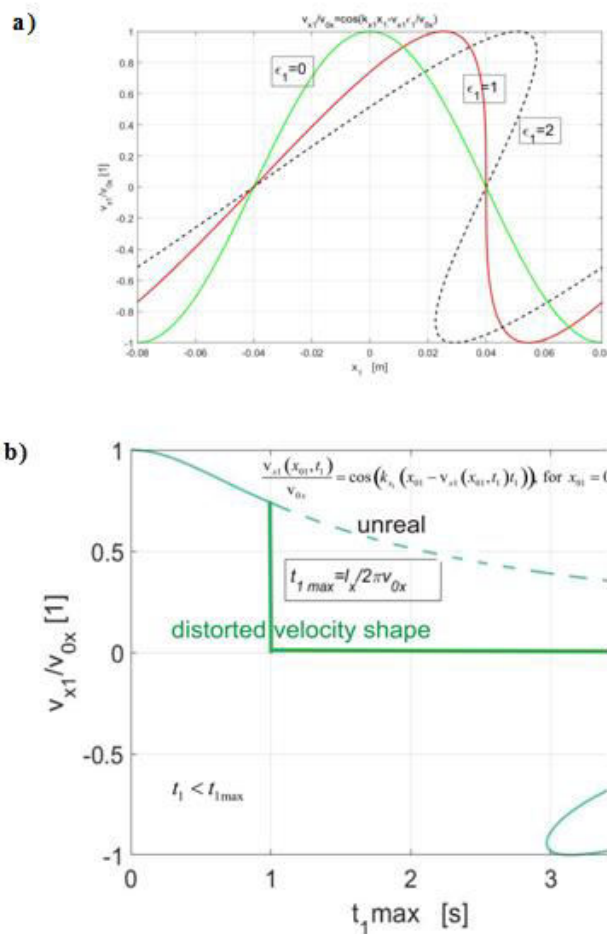
Obr. 112 Deformační vlna se v prostoru pod ochranným štítem šíří jako vlna rovinná (v_c) ve směru nárazu, ale i jako vlna osově symetrická (\dot{v}_{ct}) šířící se ve směru kolmém - vlna šikmá [experimentální data]

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. 113* dochází v důsledku zestrnění mechanické poruchy k nárůstu gradientu rychlosti a tím i **díky viskozitě μ k jejímu útlumu**. Dále jsme schopni viz *kapitole 16.7.2.* dopočítat (hustotu mechanické energie, disipovanou mechanickou energii, gradient rychlosti nebo disipovaný výkon).

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

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



Obr. č. 113 Vývoj rychlostního pole v bodě MID1 na čase po dopadu projektilu [experimentální data]

- a) Zestrnění harmonické poruchy (0.21) v důsledku parametru $\varepsilon_1(t_1)$, který narůstá s časem
- b) Průběh rychlosti, tak jak je vnímán v poloze x_{01} . V čase $t_1 \leq t_{1max}$ dochází k mírnému poklesu rychlosti a v čase $t_1 > t_{1max}$ 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 $t_{1\max} = 8.3$ ms, pokles rychlosti se vzdáleností), tak i kvantitativně jak analytickému řešení, tak i experimentu.

Na *obrázcích č. 113 a) + b)* je patrné, že podmínka (0.24) je splněna pro

$$\varepsilon_1(t_1) = v_{0x1} k_x t_{1\max} = 1, \text{ tj. } w = \frac{v_{x1}(x_{01}, t_1)}{v_{0x1}} = -\frac{\pi}{2} \quad (0.35)$$

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 $\varepsilon_1(t_1) = v_{0x1} k_x t_{1\max} = 1$, můžeme upravit pro postupnou vlnu (0.20), jejíž fáze je $\omega t - k_x x = 0$

$$\omega = \frac{k_x x}{t} = k_x v_{0x1} = \frac{k_x v_{0x1} t}{t} = \frac{1}{t_{1\max}}, \text{ nebo } t_{1\max} = \frac{1}{v_{0x1} k_x} = \frac{l_x}{2\pi v_{0x}} = \frac{1}{\omega} \quad (0.36)$$

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, viz (0.33). 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 $t_{1\max} = 8.3$ ms a ve vzdálenosti $x_{distor} = 58$ 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 vlastnosti) 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. 25* uvádíme další experimentální parametry pro použité zbraňové systémy.

Tab. 25 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}	(0.27)	68	103	52
Max. průhyb BOP - vysokofrek. kamera	$x_{c \max}$		69	62	55
Doba interakce [ms]	$t_{\text{int}} = \pi / (2\omega_B)$	(0.29)	13	12	41
Oblast největší deformace [mm]	$0.841 x_{\max}$		57	85.7	43
Rychlost kontaktu [m/s]	$\omega_B x_{\max}$	(5.45)	8.16	13.26	2.38
Rychlost zestrnutí 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	$r = \sqrt{1 + \frac{\omega_B}{\sqrt{\frac{E_B}{m_B} - \left(\frac{M_B}{2m_B}\right)^2}} \cdot d_p}$	(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 x_{\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 nařítování deformačních účinků expanzních střel.

17 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 kritériemi (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 uměle vytvořených 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 uměle vytvořeného 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. 85*). 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 útočnicka 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 (*tabulka č. 20*) 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 ultra-orientovaná 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 (*kapitola č. 11.5*) a záznamů z Mikro-CT (*kapitola č. 12.4.*) 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 (obrázky č. 97, 98, 99). 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 nábojů .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 25*.

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. 112). 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 *obrázku č. 93, 95 a 113* 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 vytěsněným objemu tkáň 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 usmrcených 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.

18 Seznam příloh

19 Seznam obrázků

- Obrázek 1.** Obecné členění všeobecné balistiky
- Obrázek 2.** Třídění kriminalistické balistiky a biobalistiky
- Obrázek 3.** Proudění na ústí hlavně pistole
- Obrázek 4.** Oblasti, do nichž zasahuje biobalistika
- Obrázek 5.** Matematická modelace lidských orgánů pro výpočet ranivých účinků a predikce očekávaného zranění
- Obrázek 6.** Magnusova síla
- Obrázek 7.** Vývoj střeliva z ručních zbraní od počátku 19. století v tomto případě zbraní švýcarské armády
- Obrázek 8.** Střely různého provedení zleva homogenní střela s kulatou špičkou, poloplášťová střela, poloplášťová střela s expanzní dutinou, celoplášťová střela s expanzní dutinou, různé typy celoplášťových střel
- Obrázek 9.** Puškové vojenské náboje s celoplášťovými střelami (*zleva*): **A** - 7,62 x 54R; **B** - 7,62 x 51 (*standart NATO*); **C** - 7,62 x 39; **D** - 5,45 x 39; **E** - 5,56 x 45 (*standart NATO*)
- Obrázek 10.** Revolverové náboje ráže .357 Magnum se střelou celoplášťovou - FMJ (*vlevo*), poloplášťovou - SP (*uprostřed*) a expansivní - HP (*vpravo*)
- Obrázek 11.** Pistolový náboj ráže 9 mm Luger s expansivní střelou Gold Dot (*vlevo*) a expandovaná střela po proniku želatinovým zkušebním blokem (*vpravo*)
- Obrázek 12.** Expansivní celoplášťové střely FMJ různé ráže a různého stupně expanze po proniku zkušebním blokem z náhradního materiálu
- Obrázek 13.** 9 mm Luger s celoplášťovou střelou vyráběný tuzemskou firmou *Sellier & Bellot*
- Obrázek 14.** 9 mm Luger Black Mamba Duty celoplášťová střela s přední částí tvaru komolého kužele vyráběný firmou *Fiocchi*
- Obrázek 15.** 7,62 × 25 mm Tokarev je ruský celoplášťový pistolový náboj vyráběný firmou *Sellier & Bellot*
- Obrázek 16.** Náboj 9 mm .357 Magnum GOLD DOT celoplášťová střela s kuželovou přední částí a vysokým zastavovacím účinkem vyráběný firmou *Speer*
- Obrázek 17.** Náboj 9 mm .357 Magnum celoplášťová střela s olověným jádrem, které je překryto kovovým pláštěm
- Obrázek 18.** .44 Magnum poloplášťová střela se zploštělou špičkou

- Obrázek 19.** Fotodokumentace použitých zbraňových systémů (*zleva*) - Luger 9 mm, Black mamba 9 mm, Tokarev 7,62 x 25 olověné jádro, Tokarev 7,62x25 ocelové jádro, .357 Magnum 9 mm., Gold Dot 9 mm, .44 Reming. Mag.
- Obrázek 20.** Ukázka použitých zbraňových systémů a jejich deformace vzhledem k použitému materiálu. V prvním sloupci poukážeme na náboj v základním konstrukčním uspořádání.
- Obrázek 21.** Charakteristický tvar střelného kanálu v bloku náhradního materiálu
- Obrázek 22.** Obloukovitý kanál v bloku mýdla
- Obrázek 23.** Dočasná (*vlevo*) a trvalá dutina (*vpravo*) v bloku balistické želatiny
- Obrázek 24.** Zóna poranění tkáně na příčném řezu střelným kanálem
- Obrázek 25.** Ukázka tříštivého účinku střely na zvířecím vzorku (*vysoká zvěř*)
- Obrázek 26.** Fragmentační nomenklatura: **A** - střela před dopadem **B** - deformace střely s různým stupněm fragmentace **C** - pronikání kulky materiálem a její rotace **D** - výlet náboje jenž se separoval na 2 části (*jádro, plášť*)
- Obrázek 27.** Balistický účinek střel různých rychlostí na tkáně
- Obrázek 28.** Poranění tlakovou vlnou - idealizovaný graf tlakové vlny vzniklé při výbuchu v průběhu času
- Obrázek 29.** Tlaková vlna patrná při explozi
- Obrázek 30.** Podélný řez blokem standardní plastelíny (*modelovací hmota šedá*) v místě střelného kanálu
- Obrázek 31.** Blok balistické želatiny, po vyjmutí z předpřipravené formy o rozměrech 20x20x35cm
- Obrázek 32.** Předání energie expanzivní střely ráže .44 Magnum ($m_q = 15,6g$, $v_d = 372 m.s^{-1}$) želatinovému bloku, vyjádřenému součtem délek radiálních trhlin $\sum r_i$ v hloubce l_s
- Obrázek 33.** Radiální trhliny vytvořené střelou Luger 9 mm FMJ v řezu blokem balistické želatiny
- Obrázek 34.** Profily střelných kanálů (*dočasné dutiny*) v balistické želatině **A**) LUGER 9mm FMJ, **B**) Black Mamba 9 mm, **C**) Magnum 9 mm FMJ, **D**) Magnum Gold DOT
- Obrázek 35.** Obecné složení balistické želatiny
- Obrázek 36.** Obecné složení glycerínového mýdla
- Obrázek 37.** Typy střelných kanálů v mýdlovém bloku (*jednotlivé kanály jsou zobrazeny v přibližně stejném měřítku*)
- Obrázek 38.** Na obrázku je patrná nádoba s vodou, normovaná odměrka s tekutinou a balistický blok z glycerínového mýdla se vstupním otvorem

- Obrázek 39.** Sádrové vzorky získané vylitím vytvořených střelných kanálů v glycerínovém mýdle a následným rozřezáním balistického bloku
- Obrázek 40.** Similarita deformace nábojů v glycerínovém mýdle (*vlevo*) a v balistické želatině (*vpravo*). **A)** Magnum .357 Gold Dot **B)** Black Mamba 9 mm **C)** Luger FMJ **D)** Magnum .357 FMJ
- Obrázek 41.** Neprůstřelná vesta pro skryté nošení Fenix Guard
- Obrázek 42.** Rozmístění zásahu podle ČSN 39 5360
- Obrázek 43.** Rozmístění zásahů podle normy NIJ 0101.06
- Obrázek 44.** Způsob tkaní vlákna Kevlar
- Obrázek 45.** Detail úpletu para-aramidových vláken tvořících vnitřní vrstvu vesty (*vlevo zvětšeno 50x; vpravo zvětšeno 100x*) - Optický/digitální mikroskop - Hirox.
- Obrázek 46.** Konce para-aramidových vláken/svazku - detail (*zvětšeno 300x*), deformace konců vláken způsobená zastřížením - Skenovací elektronový mikroskop
- Obrázek 47.** Vlákna Twaronu pod mikroskopem
- Obrázek 48.** Skládání vláken Dyneema v netkané textíli
- Obrázek 49.** Síť vláken balistické vrstvy vesty (*vpravo zvětšeno 150x*); svazek vláken směru X (*vlevo zvětšeno 350x*) - Optický/digitální mikroskop - Hirox
- Obrázek 50.** Konce vláken/svazku po zastřížení (*vpravo zvětšeno 600x*); vlevo - detail vlákna vysokomolekulárního polyetyleny v polyesterové matici (*zvětšeno 2400x*)
- Obrázek 51.** Detail na vrstvu tkanin balistických ochranných vest: **A** - polyaramidové vlákno (*Kevlar*) **B** - polyethylenové vlákno (*Dyneema*)
- Obrázek 52.** Vzorky tkanin A a B šířky 10mm, odebraných ve směru x
- Obrázek 53.** *vlevo* - Zkušební stroj Zwick/Roell Z005; *vpravo* - detail uchycení vzorku v čelistech zkušebního stroje
- Obrázek 54.** Vzorek typ A - upevnění ve zkušebním stroji, stav po testu a detail poškození tkaniny
- Obrázek 55.** Vzorek typ B - upevnění ve zkušebním stroji, stav po testu a detail poškození tkaniny
- Obrázek 56.** *vlevo* - schematické znázornění lidského torza (*frontální pohled*) z umístěním vitálních orgánů, *uprostřed* - znázornění funkce Traumashield, *vpravo* - numerická simulace deformace měkkého balistického panelu pa nárazu MRS (*malorážového střeliva*) s využitím metody MKP (*metoda konečných prvků*)

- Obrázek 57.** Antišoková vložka vytvořená z aramidových vláken
- Obrázek 58.** Měření hloubky vtisku za balistickou ochranou pomůckou v náhradních materiálech po zkušebním vstřelu (*vlevo - balistická želatina*). *Vpravo - záznam vysoko-frekvenční kamery získán z NM (glycerínové mýdlo)*
- Obrázek 59.** Skelet hrudníku prasete, kdy vysokofrekvenční kamera je umístěna kaudálně v oblasti břicha. Na snímku vlevo můžeme pozorovat markery umístěné v pravé polovině hemithoraxu na vnitřní straně žeber. Pravý snímek poukazuje na deformaci vč. zlomeniny několika žeber směrem do hrudní dutiny při zásahu náboje 12.7 mm do neprůstřelné balistické pomůcky NIJ III.
- Obrázek 60.** Popisuje vývoj při vytváření počítačového modelu lidského torza, jenž je součástí vývojové divize Sandia Eulerian Shock Wave Physics Code
- Obrázek 61.** *vlevo -* maximální kompresní tlak vytvořený po impaktu nábojem 9 mm FMJ při prováděné simulaci - sagitální řez. *Vpravo -* axiální řez
- Obrázek 62.** Interiér balistické laboratoře Prototypa - ZM s.r.o., Brno
- Obrázek 63.** Mobilní střelecká stolička STZA 12M1
- Obrázek 64.** Balistický uzávěr UZ-67 jako alternativa použité zbraně
- Obrázek 65.** Optická hradla pro měření rychlosti
- Obrázek 66.** Stručné schéma synchronizační PTU-1 jednotky v reálném experimentu
- Obrázek 67.** DRS-1 Doppler Radar System
- Obrázek 68.** 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
- Obrázek 69.** Předozadní projekce pro náboj .357 Magnum Gold DOT, parametrizuje jednotlivé průměry á 10 mm ve směru dráhy letu
- Obrázek 70.** SkyScan - 1272 stolní CT - mikrotomograf s vysokým rozlišením a automatickým měničem vzorků
- Obrázek 71.** Variabilní skenovací geometrie pro nejlepší skenování při libovolném zvětšení
- Obrázek 72.** 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)
- Obrázek 73.** 3D rekonstrukce balistické ochranné pomůcky UHMWPE 30 vrstev po zásahu, jednotlivými typy použité munice. **A** - Magnum .357 Gold DOT; **B** - Luger 9mm FMJ; **C** -reming. .44 Magnum
- Obrázek 74.** HandyScan 3D 700 laserový skener od společnosti CREAFORM

- Obrázek 75.** Pomocí software - VX elements zpracované konkávní dutiny v glycerínovém mýdle po zásahu experimentálních střel
- Obrázek 76.** Parametrický 3D model zpracovaný za pomoci software - VX elements zobrazující konkávní průhyby v balistické ochranné pomůcce - UHMWPE 30 vrstev
- Obrázek 77.** Komprese struktur s různou elasticitou: velmi měkká struktura (**A**), měkká struktura (**B**), tuhá struktura (**C**). Komprese tkáně v jednom směru obvykle vede ke změně rozměru struktury ve směru kolmém na směr působící síly
- Obrázek 78.** Posun tkáně se vyhodnocuje jako časový rozdíl UZ signálů (*paprsky A-módu*) odražených v různých hloubkách tkáně (*měřící okna*) před a po stlačení. Časové posunutí měřících oken před a po kompresi ΔT se obvykle vztahuje k časové vzdálenosti měřících oken T před kompresí
- Obrázek 79.** Vznik střižných vln (shear waves) v různých hloubkách tkáně s využitím fokusace UZ paprsku do více fokusačních zón
- Obrázek 80.** Ultrazvuková elastografie - 10 % balistická želatina. Rychlost šíření zvukové vlny v náhradním materiálu při kompresi
- Obrázek 81.** Ultrazvuková elastografie - 10 % balistická želatina. Velikost odporu náhradního materiálu při komprimaci vzorku sondou
- Obrázek 82.** Schematické rozvržení experimentu
- Obrázek 83.** 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 uměle vytvořeným materiálem
- Obrázek 84.** Střela .357 Magnum 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 uměle vytvořeným materiálem
- Obrázek 85.** 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 uměle vytvořeným materiálem
- Obrázek 86.** Vzorky tkanin/folie ochranných vest
- Obrázek 87.** Síly působící na experimentální náhradní materiál (*Ž-10*) před deformací
- Obrázek 88.** 1D deformace tyče v aktuální konfiguraci
- Obrázek 89.** Vychýlení tělesa po nárazu střely s kinetickou energií W_{kin}
- Obrázek 90.** Experimentální zařízení modelující chování zasaženého při reálné situaci
- Obrázek 91.** Experimentální zařízení - *pohled zepředu*

- Obrázek 92.** Schematické uspořádání experimentu
- Obrázek 93.** Deformační vlna postupující zprava-doleva v náhradním materiálu po zachycení experimentální munice do balistické ochranné pomůcky
- Obrázek 94.** Rozmístění sledovaných markerů v balistické želatině; rozměry želatinového kvádrů
- Obrázek 95.** Šíření deformační vlny amplitudy $u_{0,x} = 69$ mm. Disperse vlny je patrna jen pro $x \leq 10$ cm. Rychlost šíření počátku vlny F.W. (Front Wave) a maxima vlny M.W. (Max. Wave)
- Obrázek 96.** Šíření podélné rychlostní vlny $v_x(x,t)$
- Obrázek 97.** Výměna hybnosti (*energie*) při nárazu probíhá přes kontaktní povrch, s vnější normálou $\mathbf{n}_c = (-1, 0, 0)$, kde vzniká kontaktní síla \mathbf{F}_c
- Obrázek 98.** Interakce projektilu s ochranným štítem
- Obrázek 99.** Grafické zobrazení průhybu balistické ochranné pomůcky (*BOP*) přiložené na NM po impaktu
- Obrázek 100.** Sagitální průřez lidským tělem vč. BOP - vzhledem k rozdílným elastickým vlastnostem každé vrstvy lidského organismu
- Obrázek 101.** Tvar povrchu ochranného štítu po kontaktu s projektilem
- Obrázek 102.** Průběh zakřivení povrchu štítu po dopadu projektilu při použití deformovaného objemu
- Obrázek 103.** Posuv kontaktní plochy po zavedení deformovaného objemu
- Obrázek 104.** Deformační vlna se v prostoru pod ochranným štítem šíří i do směru kolmého na směr dopadu projektilu
- Obrázek 105.** Průběh podélné výchylky a podélné rychlosti v bodě $x_1 = 3$ cm v čase $t \in (0, 2t_{1\max})$ vypočtené podle teoretických vztahů pro $t_{1\max} = 8.3$ ms
- Obrázek 106.** Hustota mechanické energie po dopadu projektilu
- Obrázek 107.** Hustota disipované energie po dopadu projektilu
- Obrázek 108.** Numerické řešení rychlostní vlny za počáteční podmínky (5.36) do času zestrnutí $t_{1\max} = 8.3$ ms a času 83ms.
- Obrázek 109.** Vývoj pulzu rychlostního pole v bodě *MIDI* po dopadu projektilu
- Obrázek 110.** Schéma interakce projektilu s ochranným štítem
- Obrázek 111.** Tvar povrchu ochranného štítu po kontaktu s projektilem. Model interakce

Obrázek 112. Deformační vlna se v prostoru pod ochranným štítem šíří jako vlna rovinná (v_c) ve směru nárazu, ale i jako vlna osově symetrická (v_{ct}) šířící se ve směru kolmém - vlna šikmá

Obrázek 113. Vývoj rychlostního pole v bodě MID1 na čase po dopadu projektilu

20 Seznam tabulek

- Tabulka 1.** Základní konstrukční charakteristiky zkoumaných nábojů
- Tabulka 2.** Příčiny poranění v různých ozbrojených konfliktech
- Tabulka 3.** Zranění v různých ozbrojených konfliktech podle lokalizace
- Tabulka 4.** Hodnocení želatiny a mýdla
- Tabulka 5.** Form Faktor pro StP (*Stopping Power*) a RSP (*Relative Stopping Power*)
- Tabulka 6.** Srovnání účinnosti vybraných střel a jejich hodnocení dle stanovených mezinárodních kritérií (W_H , W_{TH} , StP , RSP)
- Tabulka 7.** Hodnota přenosu energie (ET) pro PIR podle *E.A. Matunase*
- Tabulka 8.** Číslo ráže D běžně používaných rozsahů ráží pro *PIR*
- Tabulka 9.** Hodnotící tabulka účinnosti střel *podle PIR*
- Tabulka 10.** Hodnoty „OSS“ vybraného pistolového a revolverového střeliv (*podle Marshalla a Sandowa*)
- Tabulka 11.** Třídy balistické odolnosti podle americké normy *NIJ Standard – 0101.06*
- Tabulka 12.** Třídy balistické odolnosti podle české normy ČSN 39 5360
- Tabulka 13.** Fyzikální a mechanické vlastnosti aramidových vláken
- Tabulka 14.** Základní technické parametry HandyScan 3D 700
- Tabulka 15.** Elasticita biologických tkání
- Tabulka 16.** Hustota biologických tkání
- Tabulka 17.** Zjištěné hodnoty pro náhradní materiál (*glycerinové mýdlo*)
- Tabulka 18.** Zjištěné hodnoty pro náhradní materiál (*balistická želatina*)
- Tabulka 19.** Porovnání mezinárodně uznávaných kritérií s experimentálními
- Tabulka 20.** Hodnoty výsledných mechanických charakteristik experimentálních materiálů
- Tabulka 21.** Výsledné mechanické charakteristiky
- Tabulka 22.** Materiálové parametry náhradního materiálu tkáně *Ž-10*
- Tabulka 23.** Maximální výchylka $u_{xi} = u_x(x_i, t)$ testovacího (*materiálového*) bodu pro střelu .357 Magnum FMJ
- Tabulka 24.** Geometrické a materiálové parametry těles a materiálů použitých při experimentu
- Tabulka 25.** Experimentálních parametrů charakterizující defenzivní účinky BOP

21 Seznam grafů

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

22 Dostupná literatura

1. Advanced Trauma Live Support - program for Doctors. Chicago: *American College of Surgeons - Committee on Trauma*, 1997. ISBN 9781880696101.
2. ATTWOOD, D. Nanotomography comes of age. *Nature* [online]. 2006, **442**(7103), 642-643 [cit. 2016-09-03]. DOI: 10.1038/442642b. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/442642b>
3. BACKSTEIN, G. *Rheinmetall Waffentechnisches Taschenbuch*. Düsseldorf: Reinmetall, 1972.
4. KNEUBUEHL, BP. (ED.), COUPLAND, RM. [TRANSL. RAWCLIFFE, S.]. *Wound ballistics basics and applications; with 156 tables*. Transl. of the rev. 3. German ed. (2008). Berlin: Springer Medizin, 2011. ISBN 9783642203558.
5. BENEŠ, A. *Účinek malorážových střel vysoké rychlosti*. Vojenské zdravotnické listy – Sborník, 1974.
6. BOCK, G., SEITZ, G., HABERSBRUNNER.H. *Handbuch der Faustfeuerwaffen*. 8., neubearb. und erw. Aufl. Melsungen: Neumann-Neudamm, c1989. ISBN 978-3788804978.
7. BRDIČKA, M. *Mechanika kontinua*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959.
8. BRESSON, F., DUCOURET, J., PEYRÉ, J., MARÉCHAL, C., DELILLE, R., COLARD, T., & DEMONDION, X. Experimental study of the expansion dynamic of 9mm Parabellum hollow point projectiles in ballistic gelatin. *Forensic Science International* [online]. 2012, **219**(1-3), 113-118 [cit. 2013-09-29]. DOI: 10.1016/j.forsciint.2011.12.007. ISSN 03790738. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379073811005998>
9. BURKLE, FM., NEWLAND, C., MEISTER, SJ. & BLOOD, CG. Emergency Medicine in the Persian Gulf War—Part3: Battlefield Casualties. *Annals of Emergency Medicine* [online]. 1994, **23**(4), 755-760 [cit. 2012-01-09]. DOI: 10.1016/S0196-0644(94)70311-6. ISSN 01960644. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196064494703116>
10. CANNON, L. Behind Armour Blunt Trauma - an emerging problem. *Journal of the Royal Army Medical Corps* [online]. 2001, **147**(1), 87-96 [cit. 2013-05-20]. DOI: 10.1136/jramc-147-01-09. ISSN 0035-8665. Dostupné z: <http://jramc.bmj.com/lookup/doi/10.1136/jramc-147-01-09>
11. CARANTA, R. & LEGRAIN, D. *L'Efficacité des munitions d'armes de poing*. Édition : 2e éd. Editeur : Crépin-Leblond, 1980. ISBN B000XBGUWS.
12. CAREY, ME. Analysis of wounds incurred by U.S. Army Seventh Corps personnel treated in Corps hospitals during Operation Desert Storm: February 20 to March 10 1991. *J Trauma*. 1996, **40**(3), 165-9.

13. CARMONT, MR. The Advanced Trauma Life Support course: a history of its development and review of related literature. *Postgraduate Medical Journal* [online]. 2005, **81**(952), 87-91 [cit. 2016-07-01]. DOI: 10.1136/pgmj.2004.021543. ISSN 0032-5473. Dostupné z: <http://pmj.bmj.com/cgi/doi/10.1136/pgmj.2004.021543>
14. COOPER, CF. & TAYLOR, PA. Virtual Simulation of Blast, Behind-Armor Blunt Trauma, and Projectile Penetration Leading to Injury of Life-Critical Organs in the Human Torso. In: *Volume 3: Biomedical and Biotechnology Engineering* [online]. ASME, 2015, 2015-11-13, V003T03A061- [cit. 2016-06-16]. DOI: 10.1115/IMECE2015-52631. ISBN 978-0-7918-5738-0. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/IMECE2015-52631>
15. COOPER GJ., & TAYLOR, DEM. Biophysics of impact injury to the chest and abdomen. *J R Army Med Corps* 1989; 135:58-67.
16. COSMACINI, P. & PIACENTINI, P. Notes on the history of the radiological study of Egyptian mummies: from X-rays to new imaging techniques. *La radiologia medica* [online]. 2008, **113**(5), 615-626 [cit. 2016-12-20]. DOI: 10.1007/s11547-008-0280-7. ISSN 0033-8362. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11547-008-0280-7>
17. COUPLAND, RM. *The Red Cross Wound Classification: International Committee Of The Red Cross*. Geneva: Medical Division, 1991.
18. COUPLAND, RM. Epidemiological approach to surgical management of the casualties of war. *BMJ*. 1994, (308), 1693 – 1697.
19. COUPLAND, RM & MEDDINGS, DR. Mortality associated with use of weapons in armed conflicts, wartime atrocities, and civilian mass shooting:: literature review. *BMJ*. 1999, **319**(7207), 407-410.
20. CRONIN, DS. *Material properties for numerical simulations for human, ballistic soap and gelatin: High Level Technology Review*. Canada, 2010.
21. CRONIN, DS. & FALZON, C. Characterization of 10% Ballistic Gelatin to Evaluate Temperature, Aging and Strain Rate Effects. *Experimental Mechanics* [online]. 2011, **51**(7), 1197-1206 [cit. 2012-09-10]. DOI: 10.1007/s11340-010-9438-z. ISSN 0014-4851. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11340-010-9438-z>
22. ČERNÝ, P. Balistická ochrana.: *Střelecká revue*. Praha: Pražská vydavatelská společnost, 2008, **40**(12). ISSN 0322-7650.
23. DE CRESPIGNY, A., BOU-RESLAN, H., NISHIMURA, MC., PHILLIPS, H., CARANO, RAD. & D'ARCEUIL, HE. 3D micro-CT imaging of the postmortem brain. *Journal of Neuroscience Methods* [online]. 2008, **171**(2), 207-213 [cit.

- 2015-01-03]. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2008.03.006. ISSN 01650270. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165027008001611>
24. DEMUTH, WE. Ballistic characteristics of “Magnum” sidearm bullets. *Journal of Trauma* [online]. 1974, 227-229 [cit. 2014-12-20].
 25. DINLEY, J., HAWKINS, L., PATERSON, G, BALL, AD., SINCLAIR, I., SINNETT-JONES P. & LANHAM, S. Micro-computed X-ray tomography: a new non-destructive method of assessing sectional, fly-through and 3D imaging of a soft-bodied marine worm. *Journal of Microscopy* [online]. 2010, **238**(2), 123-133 [cit. 2015-01-03]. DOI: 10.1111/j.1365-2818.2009.03335.x. ISSN 00222720. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2818.2009.03335.x>
 26. DOYLEY, MM. Model-based elastography: a survey of approaches to the inverse elasticity problem. *Physics in Medicine and Biology* [online]. 2012, **57**(3), R35-R73 [cit. 2016-03-03]. DOI: 10.1088/0031-9155/57/3/R35. ISSN 0031-9155. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0031-9155/57/i=3/a=R35?key=crossref.7ae4f9dca2362a456e81960acc8e7269>
 27. DUDAK, J., ZEMLIČKA, J., KREJCI, F., POLANSKY, S., JAKUBEK, J., MRZILKOVA, J., PATZELT, M. a TRNKA. J. X-ray micro-CT scanner for small animal imaging based on Timepix detector technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2015, **773**, 81-86 [cit. 2016-07-11]. DOI: 10.1016/j.nima.2014.10.076. ISSN 01689002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900214012443>
 28. GOLDFARB, M, T CLUREJ, M WEINSTEIN a L METKER. A Method for Soft Body Armor Evaluation. *Medical Assessment*. Edgewood Arsenal: Aberdeen Proving Ground, 1975. EB-TR-74073.
 29. HANLON, E. & GILLICH, P. Origin of the 44-mm Behind-Armor Blunt Trauma Standard. *Military Medicine* [online]. 2012, **177**(3), 333-339 [cit. 2018-09-29]. DOI: 10.7205/MILMED-D-11-00303. ISSN 0026-4075. Dostupné z: <https://academic.oup.com/milmed/article/177/3/333-339/4283667>
 30. HATCHER, JS. *Pistols and Revolvers and Their Use*. Marshallton, Del: Small-Arms Technical Pub. Co., 1927.
 31. HATCHER, JS. *Textbook of Pistols and Revolvers: Their Ammunition Ballistics and Use*. Onslow County, N.C.: Small-Arms Technical Pub. Co., 1935.
 32. MAHONEY, PF., RYAN, JM. & BROOKS, AJ. *Ballistic trauma a practical guide*. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2005. ISBN 185233679X.
 33. SPARKS, E. *Advances in military textiles and personal equipment*. Oxford: Woodhead Pub, 2012. ISBN 9780857095572.
 34. SPOREA, I. & SIRLI, R. *Hepatic elastography using ultrasound waves*. Sharjah, U.A.E.: Bentham Science Publishers, 2012. ISBN 9781608054633.

35. PROULX, T. *Dynamic behavior of materials, volume 1 proceedings of the 2010 annual conference on experimental and applied mechanics: Loading Rate Effect on Tensile Failure Behavior of Gelatins under Mode I*. New York: Springer, 2011. ISBN 9781441982285.
36. FACKLER, M. Gunshot Wound Review. *Annals of Emergency Medicine* [online]. 1996, **28**(2), 194-203 [cit. 2014-01-29]. DOI: 10.1016/S0196-0644(96)70062-8. ISSN 01960644. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196064496700628>
37. FACKLER, ML. & MALINOWSKI, JA. The Wound Profile a Visual Method for Quantifying Gunshot Wound Components. *Journal of Trauma - Injury Infection & Critical Care*. 1985, **25**, 522-529.
38. FALLAND-CHEUNG, L., WADDELL, JN., LAZARJAN, MS., JERMY, MC., WINTER, T., TONG, D. & BRUNTON, PA. Use of agar/glycerol and agar/glycerol/water as a translucent brain simulant for ballistic testing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2017, **65**, 665-671 [cit. 2018-01-20]. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.09.034. ISSN 17516161. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175161611630340X>
39. FBI Uniform Crime Reports: Law Enforcement Officer Killed and Assaulted. 1999
40. FELSMANN, M., SZAREK, J. & BABIŃSKA, I. A review of firearms, projectile and gunshot wounds in animals. *Pak Vet J*. 2014, **34**(3), 279-287.
41. FUNG, JYY., LAI, CI. & YUEN, MF. Clinical Application of Transient Elastography (Fibroscan) in Liver Diseases. *Medical Bulletin*. 2009, **14**(11), 22-25.
42. GOAD, KJW. & HALSEY, K. *Ammunition Including Grenades & Mines*. ed1. Brassey, 1982.
43. GOFRIT, ON., KOVALSKI, N., LEIBOVICI, D., SHEMER, J., O'HANA, A. & SHAPIRA, SC. Accurate anatomical location of war injuries: analysis of the Lebanon war fatal casualties and the proposition of new principles for the design of military personal armour system. *Injury* [online]. 1996, **27**(8), 577-581 [cit. 2014-01-06]. DOI: 10.1016/S0020-1383(96)00072-1. ISSN 00201383. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020138396000721>
44. HANNA, TN., SHUAIB, W., HAN, T., MEHTA, A. & KHOSA, F. Firearms, bullets, and wound ballistics: An imaging primer. *Injury* [online]. 2015, **46**(7), 1186-1196 [cit. 2016-06-08]. DOI: 10.1016/j.injury.2015.01.034. ISSN 00201383. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020138315000601>
45. HODALIČ, Z. Surgical tretment of 1211 patients at the Vinkovci Genereal Hospital, Vinkovci, Cratia, during the 1991 - 1992 Serbian oddensive in east Slavonia. *Mil. Med*. 1999, **164**, 803-808.

46. HÖSCHL, C. *Rázová pevnost těles*. Ústav termomechaniky ČSAV, Praha: Český výbor strojnické společnosti ČSTV, 1977.
47. HÖSCHL, C. *Eseje o mechanice*. Liberec: Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7372-455-9.
48. HOSKINS, PR., MARTIN, K. & THRUSH, A. *Diagnostic ultrasound: physics and equipment*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2010. Cambridge medicine. ISBN 978-0-521-75710-2.
49. HOUNSFIELD, GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *The British Journal of Radiology* [online]. 1973, **46**(552), 1016-1022 [cit. 2016-02-02]. DOI: 10.1259/0007-1285-46-552-1016. ISSN 0007-1285. Dostupné z: <http://www.birpublications.org/doi/abs/10.1259/0007-1285-46-552-1016>
50. JEFFERY, AJ., RUTTY, GN., ROBINSON, C. & MORGAN, B. Computed tomography of projectile injuries. *Clinical Radiology* [online]. 2008, **63**(10), 1160-1166 [cit. 2016-02-02]. DOI: 10.1016/j.crad.2008.03.003. ISSN 00099260. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000992600800130X>
51. JOURDAN, PH. Behind Body armour effect: Case Report. *Defence Research Group Panel 8 STBA Collaborate*. 1995.
52. JUNG, KS. & KIM, SU. Clinical applications of transient elastography. *Clinical and Molecular Hepatology* [online]. 2012, **18**(2), 163- [cit. 2017-05-03]. DOI: 10.3350/cmh.2012.18.2.163. ISSN 2287-2728. Dostupné z: <http://e-cmh.org/journal/view.php?doi=10.3350/cmh.2012.18.2.163>
53. JURKÁČEK, B. *Návrh metodiky zjišťování a vyhodnocování účinků malorážových střel na živou sílu*. Brno: VVÚ ZVS, 1984.
54. JUŘÍČEK, L. *Simulace a hodnocení účinků malorážových střel na živou sílu*. Brno, 2000. Doktorská disertační práce. VA Brno.
55. JUŘÍČEK, L. *Ranivá balistika: technické, soudnělékařské a kriminalistické aspekty*. Ostrava: Key Publishing, 2017. Vědecká monografie. ISBN 978-80-7418-274-7.
56. JUŘÍČEK, L. Comparison of Behaviour of Alternative Materials in a Ballistic Experiment: *Crisis Management*. Žilina, 2013.
57. JUŘÍČEK, L. *Ranivá balistika I: (úvod do studia ranivé balistiky)*. Brno: Vysoká škola Karla Engliše, 2013. ISBN 978-80-86710-69-3.
58. JUŘÍČEK L., MORAVANSKÝ N. & REKEŇ, V. *Vzdálené fraktury dlouhých kostí po zásahu dolní končetiny malorážovou střelou*. Brno: Vysoká škola Karla Engliše, 2013, **8**(1). ISSN 1802-2626.
59. JUSSILA, J. Preparing ballistic gelatine—review and proposal for a standard method. *Forensic Science International* [online]. 2004, **141**(2-3), 91-98 [cit. 2014-

- 06-15]. DOI: 10.1016/j.forsciint.2003.11.036. ISSN 03790738. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379073804000477>
60. KLEIN, L. & FERKO, A. *Principy válečné chirurgie*. Praha: Grada, 2005. ISBN 8024707357.
 61. KNEUBUEHL, BP. *Balistika: střely, přesnost střelby, účinek*. Praha: Naše vojsko, 2004. ISBN 80-206-0749-8.
 62. KNEUBUEHL, BP. & SELIER, K. *Wundballistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001 [cit. 2012-05-30]. ISBN 978-3-662-10979-3.
 63. KNEUBUEHL, BP., COUPLAND, RM., MARKUS, AR. & MICHAEL, JT. *Wound Ballistics, Basic and Application*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
 64. KNOTKOVÁ, M. *Polymerní materiály ve vojenském průmyslu*. Zlín, 2014. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů.
 65. KOMENDA, J., HEJNA, P., RYDLO, M., NOVÁK, M., KRAJSA, J., RACEK, F., REJTAR, P. & JEDLIČKA, L. Forensic and clinical issues in the use of frangible projectile. *Journal of Forensic and Legal Medicine* [online]. 2013, **20**(6), 697-702 [cit. 2014-01-09]. DOI: 10.1016/j.jflm.2013.04.006. ISSN 1752928X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1752928X13001224>
 66. KOMENDA, J. & JUŘÍČEK L. *Střelná poranění a ranivá balistika*. Praha: Pražská vydavatelská společnost, 1999, **4**.
 67. KRUPICA, D. *Studie využití prostředků balistické ochrany v SBS*. Zlín, 2009. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
 68. LANDAU, LD. *Course of theoretical physics*. 3rd eng. ed., rev. and enl. Přeložil SYKES, JB. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 9780750626330.
 69. LAURIDSEN, H., HANSEN, K. & WANG, T. Inside Out: Modern Imaging Techniques to Reveal Animal Anatomy. *PLoS ONE* [online]. 2011, **6**(3) [cit. 2015-02-03]. DOI: 10.1371/journal.pone.0017879. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0017879>
 70. LEEMING, D. *Wound Ballistics: Ballistic course*. RMCS Shrivenham, 1998.
 71. LIŠKA P. Balistická ochrana jednotlivce: setrvalý stav, anebo dynamický vývoj?: *Střelecké revue*. Praha: Pražská vydavatelská společnost, 2016, **48**(11). ISSN 0322-7650.
 72. MABRY, RL. United States Army Rangers in Somalia: An analysis of combat casualties on an urban battlefield. *J Trauma*. 2000, **49**, 515-528.
 73. MAHLTIG, B. & TEXTOR, T. *Nanosols and textiles*. New Jersey: World Scientific, c2008. ISBN 9812833501.

74. MARSHALL, EP. & SANOW, EJ. *Handgun stopping power: the definitive study*. Boulder, Colo.: Paladin Press, c1992. ISBN 0-87364-653-3.
75. MARSHALL, EP & SANOW, EJ. *Street stoppers: the latest handgun stopping power street results*. Boulder, Colo.: Paladin Press, c1996. ISBN 0873648722.
76. MARSHALL, EP. & SANOW, EJ. *Stopping power: a practical analysis of the latest handgun ammunition*. Boulder, Colo.: Paladin Press, c2001. ISBN 158160128x.
77. MARŠÍK, F. *Termodynamika kontinua*. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-20007-58-x.
78. MARŠÍK, F. *Šíření vln a nelineární jevy v disipativních systémech*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-248-3668-3.
79. MATUNAS, EA. "Power Index Rating". Gun Digest 84: DBI Books, 1984.
80. MIZUTANI, R. & SUZUKI, Y. X-ray microtomography in biology. *Micron* [online]. 2012, **43**(2-3), 104-115 [cit. 2016-02-13]. DOI: 10.1016/j.micron.2011.10.002. ISSN 09684328. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968432811001788>
81. MURPHY, J. *Additives for plastics handbooks*. 2nd ed. New York, NY, USA: Elsevier Science, c2001. ISBN 1856173704.
82. NETTO, FS., PANNELL, F. & TIEN, CH. Hollow-point ammunition and handguns: The potential for large temporary cavities. *Injury Extra: 39*. 2008, 50–52.
83. NICOLLE, S., NOGUER, L. & PALIERNE, JF. Shear mechanical properties of the spleen: Experiment and analytical modelling. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2012, **9**, 130-136 [cit. 2017-02-02]. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2012.02.005. ISSN 17516161. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616112000549>
84. PARK, K., GLADIUS, L., LEWIS, L. & JOON, BP. *Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE): Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering*. 2004;1690-1696.
85. PELEG, K., RIVKIND, A. & AHARONSON-DANIEL, L. Does Body Armor Protect from Firearm Injuries?. *Journal of the American College of Surgeons* [online]. 2006, **202**(4), 643-648 [cit. 2014-07-19]. DOI: 10.1016/j.jamcollsurg.2005.12.019. ISSN 10727515. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1072751505019605>
86. PLANKA, B. *Kriminalistická balistika*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2010. ISBN 978-80-7380-036-9.
87. PLÍHAL, B. *Balistická ochrana*. Brno: Univerzita obrany, 2012. ISBN 978-80-7231-862-9.

88. PRAGOMET, D. Mortality caused by war wounds to the head and neck encountered at Slavonski Brod Hospital during the 1991-1992 war in Croatia. *Mil. Med.* 1998, **163**, 482-485.
89. PRAT, NJ., DABAN, JL., VOIGLIO, EJ. & RONGIERAS, F. Wound ballistics and blast injuries. *Journal of Visceral Surgery* [online]. 2017, **154**, S9-S12 [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.1016/j.jviscsurg.2017.07.005. ISSN 18787886. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187878861730084X>
90. PTÁČEK, M. *Balistická ochrana pracovníka Průmyslu komerční bezpečnosti*. Zlín, 2007. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Ústav elektrotechniky a měření.
91. RADFORD, DD., MCSHANE, GJ., DESHPANDE, VS., & FLECK, NA. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2006, **43**(7-8), 2243-2259 [cit. 2016-07-31]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.07.006. ISSN 00207683. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768305004403>
92. RITMAN, EL. Small-animal CT: Its difference from, and impact on, clinical CT. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2007, s. 968–970.
93. RITMAN, EL. Micro-Computed Tomography-Current Status and Developments. *Annual Review of Biomedical Engineering* [online]. 2004, **6**(1), 185-208 [cit. 2017-02-27]. DOI: 10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140130. ISSN 1523-9829. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140130>
94. RITMAN, EL. Molecular imaging in small animals roles for micro-CT. *Journal of Cellular Biochemistry* [online]. 2002, **87**(S39), 116-124 [cit. 2017-02-27]. DOI: 10.1002/jcb.10415. ISSN 0730-2312. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jcb.10415>
95. ROWE, WF. Firearms, Weapons, Ammunitions and Penetration. *Encyclopedia of Forensic Sciences*. 2000, s. 961-969.
96. RUTTY, GN., BOYCE, P., ROBINSON, CE., JEFFERY, AJ. & MORGAN, B. The role of computed tomography in terminal ballistic analysis. *International Journal of Legal Medicine* [online]. 2008, **122**(1), 1-5 [cit. 2015-01-09]. DOI: 10.1007/s00414-006-0145-3. ISSN 0937-9827. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00414-006-0145-3>
97. SALISBURY, CP. & CRONIN, DS. Mechanical Properties of Ballistic Gelatin at High Deformation Rates. *Experimental Mechanics* [online]. 2009, **49**(6), 829-840 [cit. 2014-08-20]. DOI: 10.1007/s11340-008-9207-4. ISSN 0014-4851. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11340-008-9207-4>

98. SEDLÁŘ, M., STAFFA, E. & S. MORNSTEIN. *Zobrazovací metody využívající neionizující záření*. Brno, 2013. Biofyzikální ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně.
99. SEE, C., STUEHMERT, A., GELLRICH, NC., BLUM, KS., BORMANN, KH. & M. RÜCKER. Wound Ballistics of Injuries Caused by Handguns With Different Types of Projectiles. *Military Medicine*. 2009, (174), 757-761.
100. SELLIER, K. Bemerkungen zur Arbeit von D. Tausch et al. *Zeitschrift für Rechtsmedizin* [online]. 1979, **83**(2), 163-168 [cit. 2018-09-29]. DOI: 10.1007/BF02092274. ISSN 0044-3433. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02092274>
101. SELLIER, K. & KNEUBUEHL, BP. *Wundballistik und ihre ballistischen Grundlagen: mit 115 Tabellen*. 2., völlig überarb. und erg. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2001. ISBN 9783540666042.
102. SELLIER, KG. & KNEUBUEHL, BP. *Wound ballistics and the scientific background*. New York: Elsevier, 1994. ISBN 0444815112.
103. SELLIER, K. & KNEUBUEHL, B. *Wundballistik und ihre ballistischen Grundlagen*. Berlin: Springer-Verlag, 1992. ISBN 3540548556.
104. SCHAMBACH, SJ., BAG, S., SCHILLING, L., GRODEN, CH. & BROCKMANN, MA. Application of micro-CT in small animal imaging. *Methods* [online]. 2010, **50**(1), 2-13 [cit. 2015-06-30]. DOI: 10.1016/j.ymeth.2009.08.007. ISSN 10462023. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1046202309002023>
105. SCHYMA, C. & MADEA, B. Evaluation of the temporary cavity in ordnance gelatine. *Forensic Science International*. 2012, (214), 82-87.
106. SIEGEL, JA., SAUKKO, PJ. & KNUPFER, GC. *Encyclopedia of forensic sciences*. San Diego: Academic Press, c2000. ISBN 9780122272158.
107. SUNESON, A., HANSSON, HA. & SEEMAN, T. Peripheral high-energy missile hits cause pressure changes and damage to the nervous system: experimental studies on pigs. *J Trauma*. 1987, **7**(27), 782-9. ISSN 0022-5282.
108. SUN, JK., LAM, LH., ZHANG, DD. & RUAN, E. Estimating and measuring impact forces by projectile. *23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23)*. Byron Bay, NSW: Southern Cross University, Lismore, NSW, 2014, (vol. 2). ISSN 9780994152008.
109. SUSU, L., CHENG, X., YAOKE, W. & XIAOYUN, Z. A new motion model of rifle bullet penetration into ballistic gelatin. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2016, **93**, 1-10 [cit. 2017-10-19]. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.02.003. ISSN 0734743X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X16300318>

110. TAYLOR, J. *African Rifles and Calibres*. Highland Park NJ: Gun Room Press, 1948.
111. THOMAS, GE. Fatal .45–70 Rifle Wounding of a Policeman Wearing a Bulletproof Vest. *Journal of Forensic Sciences* [online]. 1982, **27**(2), 11502J [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1520/JFS11502J. ISSN 00221198. Dostupné z: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?JFS11502J>
112. UMALE, S., DECK, C., BOURDET, N., DHUMANE, P., SOLER, L., MARESCAUX, J. & WILLINGER, R. Experimental mechanical characterization of abdominal organs: liver, kidney & spleen. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2013, **17**, 22-33 [cit. 2017-08-01]. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2012.07.010. ISSN 17516161. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616112002056>
113. VASSALLO, DJ. The International Red Cross and Red Crescent Movement and Lessons from its Experience of War Surgery. *Journal of the Royal Army Medical Corps* [online]. 1994, **140**(3), 146-154 [cit. 2016-12-14]. DOI: 10.1136/jramc-140-03-11. ISSN 0035-8665. Dostupné z: <http://jramc.bmj.com/lookup/doi/10.1136/jramc-140-03-11>
114. VOGEL, S. *Living in a physical world II.: The bio-ballistics of small projectiles*. Durham, 2005. Duke University, Department of Biology, NC 27708-0338.
115. VOGL, TJ., THEN, CH., NAGUIB, NNN., NOUR-ELDIN, NEA., LARSON, M., ZANGOS, S. & SILBER, G. Mechanical Soft Tissue Property Validation in Tissue Engineering Using Magnetic Resonance Imaging. *Academic Radiology* [online]. 2010, **17**(12), 1486-1491 [cit. 2015-06-30]. DOI: 10.1016/j.acra.2010.08.010. ISSN 10766332. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1076633210004575>
116. WALDBY, C. *The visible human project: informatic bodies and posthuman medicine*. London: Routledge, 2000. Biofutures, biocultures.
117. WEIGEL, W. *Die Wirkung von Revolver- und Pistolengesossen auf den menschlichen Körper*. Personal communication, 1975.
118. WEIGEL., W. Handbuch der Faustfeuerwaffen. *Melsungen*. Neuman-Neudamm, 1989, , 501-516.
119. WIEDEMAN, JE. & RIGNAULT, DP. Civilian Versus Military Trauma Dogma: Who Do You Trust?. *Military Medicine* [online]. 1999, **164**(4), 256-260 [cit. 2015-04-24]. DOI: 10.1093/milmed/164.4.256. ISSN 0026-4075. Dostupné z: <https://academic.oup.com/milmed/article/164/4/256/4832106>
120. YUNGWIRTH, CHJ., WADLEY, HNG., O'CONNOR, JH., ZAKRAYSEK, AJ. & DESHPANDE, VS. Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2008, **35**(8), 920-936 [cit. 2017-09-10]. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.001. ISSN

0734743X.

Dostupné

z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X07001170>

121. ČSN 39 5360. Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním: *Technické požadavky a zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
122. NIJ STANDARD-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor, Director David W. Hagy. Washington DC. 2008.
123. National Institute of Justice: Selection and Application Guide to Personal Body Armor. NIJ Guide1(X)-O1. 2001. Available at National Criminal Justice Reference System <https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/>. 2011.
124. Ústavu termomechaniky AV ČR, v.v.i. Termodynamika Prof. Ing. František Maršík, DrSc. In.: *Výuka. teorie rázu ve viskoelastickém kontinuu* [online]. ©2018 [Cit. 16.4.2018]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/cs/marsik>