

MATEMATICKÝ MODEL NÁHRADNÍCH MATERIÁLŮ (SUBSTITUCÍ) BIOLOGICKÝCH TKÁNÍ V EXPERIMENTÁLNÍ RANIVÉ BALISTICE (2. část)

MATHEMATICAL MODEL ALTERNATIVE MATERIALS (SUBSTITUTE) OF BIOLOGICAL TISSUES IN EXPERIMENTAL WOUND BALLISTIC (2nd part)

Ludvík JUŘÍČEK¹, Bohumil PLÍHAL²

SUMMARY:

The paper is dealing with alternative materials substituting for a biological tissue in ballistic experiment used both in our country and in the world. The paper limits to plastic characteristics alternative materials and mutual comparison to a real tissue represented by pork meat. The paper presents a theoretical – and – experimental method which we developed and designed for discovering physical and mechanical properties of alternative materials biological tissues, material resulted in a coherent methodology.

KEYWORDS: Mathematical model, alternative materials, substitute, ballistics experiment, mutual comparison, plastic characteristics, pork meat, theoretical and experimental method, biological tissues, experimental wound ballistic.

Poznámka: Pokračování z č. 2/2014

3.2 Výsledky experimentu

Výsledky experimentu se změřenou hloubkou vniku trnu do NM s a vypočtenými teoretickými hodnotami v_D , E_D , E_{DT} , t a R jsou uvedeny v tabulkách 3 až 6, kde:

$v_D = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ - dopadová rychlost závaží s trnem v okamžiku dopadu čela (špičky) trnu na plochu vzorku NM,

$E_D = m_T \cdot g \cdot h$ - potenciální energie závaží s trnem v okamžiku nápichu zkušební vzorku NM (při $s = 0$),

$E_{DT} = m_T \cdot g \cdot h / F_T$ - potenciální energie závaží s trnem vztažená na jednotku plochy příčného průřezu trnu ($F_T = \pi \cdot R_T^2$) v okamžiku nápichu zkušební vzorku NM (hustota energie),

$t = 2 \cdot s / \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ - čas proniku trnu do NM za předpokladu rovnoměrně zpožděného pohybu,

$R = m_T \cdot g \cdot h / s$ - střední odpor prostředí při pronikání trnu do NM.

Kromě vypočtených hodnot uvedených v tabulkách 3 až 6 byly z provedených pádových zkoušek pořízeny průběhy zbrzdění trnu v NM vyjadřující funkční závislost $a(t, h)$ pro materiály PP 75/25, Ž-20 a PL. Použitelný záznam průběhů zbrzdění trnu se nepodařilo získat u NM „M“ (vepřové maso) z důvodu nízkých hodnot setrvačných sil, působících při brzdění zkušební trnu v použitém vzorku, který svým nehomogenním uspořádáním nebyl ideální [4] (přítomnost vzduchu ve vzorku vepřového masa).

Pro měření byl použit stejný piezoelektrický akcelerometr jako v případě předchozích vzorků NM, který se u vepřového masa jevil jako málo citlivý na vnější podněty.

¹ Ludvík Juříček, doc. Ing. Ph.D., Ústav bezpečnosti, Vysoká škola Karla Engliše, a.s., Mezírka 775/1, 602 00 Brno, tel. +420 728 232 698, e-mail: ludvik.juricek@vske.cz

² Bohumil Plíhal, prof. Ing. CSc., Katedra zbraní a munice, Univerzita obrany v Brně, Kounicova 65, 612 00 Brno, tel. +420 728 776 589, e-mail: bohumil.plihal@unob.cz.

Tabulka 3

Výsledky pádové zkoušky vzorku NM PP 75/25(Použité pádové zařízení: „AMSLER“, typ: 100 FU 122, T = +21,5°C, $\rho = 933 \text{ kg.m}^{-3}$, $m_T = 2,065 \text{ kg}$)

Pokus číslo	h [m]	s [mm]	v_D [m.s ⁻¹]	E_D [J]	E_{DT} [MJ.m ⁻²]	t [s]	R [N]	Poznámka (čís. vpichu)
1.	0,5	54,7	3,1321	10,1288	0,35823	0,0349	185,17	PP-1
2.	0,8	75,0	3,9618	16,2061	0,57317	0,0379	216,08	PP-2
3.	1,1	93,0	4,6456	22,2834	0,78811	0,0400	239,60	PP-4
4.	1,4	110,4	5,2410	28,3607	1,00305	0,0421	256,89	PP-6
5.	1,7	125,8	5,7753	34,4380	1,21800	0,0436	273,75	PP-8
6.	2,0	139,0	6,2642	40,5153	1,43294	0,0444	291,48	PP-10

Zdroj: (Plíhal, B., JURÍČEK, L., 1999).

Tabulka 4

Výsledky pádové zkoušky vzorku Ž-20(Použité pádové zařízení: „AMSLER“, typ: 100 FU 122, T = +20°C, $\rho = 1100 \text{ kg.m}^{-3}$, $m_T = 0,66 \text{ kg}$)

Pokus číslo	h [m]	s [mm]	v_D [m.s ⁻¹]	E_D [J]	E_{DT} [MJ.m ⁻²]	t [s]	R [N]	Poznámka (čís. vpichu)
1.	0,2	60,0	1,9809	1,2949	0,04580	0,0606	21,58	ZL-4
2.	0,4	104,0	2,8014	2,5898	0,09160	0,0742	24,90	ZL-5
3.	0,6	138,0	3,4310	3,8848	0,13740	0,0804	28,15	ZL-6

Zdroj: (Plíhal, B., JURÍČEK, L., 1999).

Tabulka 5

Výsledky pádové zkoušky vzorku PL(Použité pádové zařízení: „AMSLER“, typ: 100 FU 122, T = +25°C, $\rho = 1710 \text{ kg.m}^{-3}$, $m_T = 2,065 \text{ kg}$)

Pokus číslo	h [m]	s [mm]	v_D [m.s ⁻¹]	E_D [J]	E_{DT} [MJ.m ⁻²]	t [s]	R [N]	Poznámka (čís. vpichu)
1.	0,2	68,0	1,9809	4,0515	0,14329	0,0687	59,58	PL-3
2.	0,5	98,0	3,1321	10,1288	0,35823	0,0626	103,36	PL-4
3.	0,8	128,0	3,9618	16,2061	0,57317	0,0646	126,61	PL-6
4.	1,0	147,0	4,4294	20,2576	0,71647	0,0664	137,80	PL-8
5.	1,2	163,0	4,8522	24,3092	0,85976	0,0672	149,13	PL-10

Zdroj: (Plíhal, B., JURÍČEK, L., 1999).

Tabulka 6

Výsledky pádové zkoušky vzorku M(Použité pádové zařízení: „AMSLER“, typ: 100 FU 122, T = +20°C, $\rho = 1015 \text{ kg.m}^{-3}$, $m_T = 2,065 \text{ kg}$)

Pokus číslo	h [m]	s [mm]	v_D [m.s ⁻¹]	E_D [J]	E_{DT} [MJ.m ⁻²]	t [s]	R [N]	Poznámka (čís. vpichu)
1.	0,020	99,0	0,6264	0,4052	0,01433	0,3161	4,09	M-2
2.	0,035	165,0	0,8287	0,7090	0,02508	0,3982	4,30	M-3
3.	0,050	180,0	0,9904	1,01294	0,03582	0,3635	5,63	M-4
4.	0,100	184,0	1,4007	2,0258	0,07165	0,2627	11,01	M-6

Zdroj: (Plíhal, B., JURÍČEK, L., 1999).

4. VÝPOČET FYZIKÁLNÍCH A MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK A JEJICH HODNOCENÍ

Fyzikální a mechanické charakteristiky zkoušených NM byly vypočteny podle vztahů (6) až (13) tab. 2, 1. část. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce 7 a to vždy pro největší pádovou výšku (h_{max}), kterou tuhost (odpor) materiálu dovolovala.

Pro porovnání zkoušených NM byly fyzikální a mechanické charakteristiky přepočítány pro stejnou dopadovou energii, jakou má NM **PP 75/25** a **PL** při $h = 1,4 \text{ m}$.

Tím byly získány referenční pádová výška $h_r = 1,4 \text{ m}$ a referenční hmotnost závaží s trnem $m_r = 2,065 \text{ kg}$.

Při podmínce $E_D = m_T \cdot g \cdot h = 28,36 \text{ [J]}$ (konstanta), přepočítaná pádová výška (h_p) se vypočítá podle vztahu:

$$h_p = h_r \cdot \frac{m_r}{m_T}$$

Tabulka 7

Fyzikální a mechanické charakteristiky zkoušených NM

Náhradní materiál (NM)			PP-II	Ž-20	PL	M
Veličina	Jednotka	Rovnice				
ρ	kg.m ⁻³	-	933	1100	1710	1015
h	m	-	2,0	0,6	1,4	0,100
s	m	-	0,139	0,138	0,174	0,184
n	-	(6a)	0,643	0,605	0,866	1,812
r_n	-	-	0,9998	0,9994	0,9992	0,8704
$A^{1)}$	-	(6b)	$-1,9072 \cdot 10^{-3}$	$66,489 \cdot 10^{-3}$	-0,15121	0,4795
$\tau_w^{2)}$	Pa	(7)	49,3852	17,5940	50,6145	2,02931
$\gamma_w^{2)}$	10 ³ s ⁻¹	(8)	4,75578	2,66071	3,62916	0,82919
$\eta^{2)}$	10 ⁻³ Pa.s	(9)	10,3843	6,61254	13,9466	2,44733
$\eta_0^{2)}$	Pa.s	(10)	0,21337	0,14902	0,04483	$1,0441 \cdot 10^{-5}$

Zdroj: (PLÍHAL, B., JURÍČEK, L., 1999)

Poznámky:

- 1) Z analýzy lineární regrese **korelační závislosti** $s(h)$ vyplývá, že je nutné v ní předsunout **činitel „A“**. Tím původní vztah (6) přejde na tvar:

$$\ln \frac{s}{s_0} = A + \frac{2-n}{2} \cdot \ln \frac{h}{h_0}. \quad (6b)$$

- 2) Význam označených veličin byl uveden v 1. části tohoto příspěvku („Krizový management“, 2/2014, Ročník 13).

Funkční závislosti získáme dosazením η_0 a n z tabulky 7 do následujících vztahů (byly již uvedeny v 1. části příspěvku, KM č. 2/2014):

$$\eta = \eta_0 \cdot \gamma_w^{n-1}. \quad (11)$$

$$\tau_w = \eta_0 \cdot \gamma_w^n, \quad (12)$$

$$\ln \tau_w = \ln \eta_0 + n \cdot \ln \gamma_w, \quad (12a)$$

Jak je uvedeno v poznámce 1 pod tabulkou 7, korelační závislost $s(h)$ je nutno vyjádřit upraveným vztahem (6b):

$$\ln \frac{s}{s_0} = A + \frac{2-n}{2} \cdot \ln \frac{h}{h_0} \quad (6b)$$

a odtud nová **hloubka vniku trnu** s při stejné E_D :

$$s = e^A \cdot s_0 \cdot \left(\frac{h_r \cdot m_r}{h_0 \cdot m_T} \right)^{\frac{2-n}{2}}$$

a **střední odporová síla** $R_{stř}$:

$$R_{stř} = \frac{m_T \cdot g \cdot h}{s} = \frac{m_r \cdot g \cdot h_r}{s} \quad (13)$$

Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce 8.

Přehled o chování NM při pronikání trnu, poskytnou **tokové křivky** v logaritmických souřadnicích (tzv. **logaritmické křivky tečení**) dané vztahem (12a), které byly zahrnuty do diagramu 7.

Pro vzájemné porovnání fyzikálních a mechanických vlastností zkouškám podrobených NM je využitelný diagram 8 **střední odporové síly** $R_{stř}$ a společný sloupcový diagram 9 hodnot **středního odporu** R , **hloubek vniku** s a **dynamické viskozity** η při stejné kinetické energii zkušební trnu $E_D = 28,36 \text{ J}$.

Tabulka 8

Porovnání fyzikálních a mechanických charakteristik NM při stejné dopadové energii $E_D = 28,36 \text{ J}$, která odpovídá referenční pádové výšce $h_r = 1,4 \text{ m}$

NM		PP	Ž-20	PL	M
Veličina	Jednotka				
ρ	kg.m ⁻³	933	1100	1710	1015
m_T	kg	2,065	0,66	2,065	2,065
h_p	m	1,4	4,380	1,4	1,4
n	-	0,643	0,605	0,866	1,812
s_0	m	0,0547	0,6	0,068	0,0990,5
h_0	m	0,5	0,2	0,2	0,02
A	-	-1,9072.10 ⁻³	66,489.10 ⁻³	-0,15121	0,4795
s	m	0,110	0,552	0,176	0,2384
τ_w	Pa	43,6835	32,1091	50,0394	21,9274

γ_w	$10^3 \cdot s^{-1}$	3,97897	7,18883	3,62916	3,10256
η	$10^{-3} Pa \cdot s$	10,9786	4,46654	13,7882	7,06753
η_0	$Pa \cdot s$	0,21167	0,14906	0,04135	$1,03274 \cdot 10^{-5}$
R	N	258,29	51,38	161,14	118,96

Zdroj: (PLÍHAL, B., JURÍČEK, L., 1999)

Výsledky provedených experimentů je nutno považovat pouze za orientační. Předložená měření měla ověřit teoretické předpoklady použití reologického modelu nenewtonské kapaliny. Naměřené hodnoty a vypočtené charakteristiky také nelze považovat za absolutní a srovnatelné s údaji uvedenými v odborných pramenech jiných autorů. Jejich hodnoty byly do jisté míry ovlivněny použitým zkušebním zařízením, přípravou zkušebních vzorků a použitou metodikou zkoušek a slouží pouze pro jejich vzájemné srovnání.

Z těchto hledisek je možné učinit následující dílčí závěry o některých fyzikálních a mechanických vlastnostech zkoušených NM:

- reprodukovatelnost výsledků měření je na vyhovující úrovni. Rozdíly, pokud k nim došlo, jsou způsobeny jinou hustotou ρ a teplotou T zkušebních vzorků a rovněž náhodnými chybami měření.
- Největší odpor proti vnikání zkušebního trnu do vzorku NM při větších ED má směs PP a nejmenší Ž-20, kdy její hodnota je překročena odporem materiálu M (viz obr. 1), což odpovídá větší směrnici logaritmické křivky tečení u materiálu M. Stejný závěr lze učinit i z diagramu na obr. 2 zobrazující průběhy střední odporové síly R zkoumaných NM v závislosti na úrovni kinetické energie ED zkušebního trnu. Směs PP 75/25 uvedená v obou diagramech pod označením I. a II. se od sebe liší stupněm jejich přetavení.
- Největší viskozitu η , a tím i podíl plastické deformace vykazuje PL a potom směs PP 75/25, naopak nejnižší potom materiály Ž-20 a M, které vykazují vyšší podíl elastické a viskoelastické deformace. S těmito údaji souvisí i další poznatek, který byl ověřen i vizuálně, že pouze PL a do značné míry také PP 75/25, po vyjmutí zkušebního trnu ze vzorku zachovávají trvalou dutinu a tím i měřitelné rozměry kanálu.
- Experimenty provedené na pádovém zařízení „AMSLER“, typ: 100 FU 122 s možností registrace $a(t)$ potvrzují, že je možné pro vzájemné porovnání fyzikálních

a také mechanických charakteristik NM uvažovat pohyb zkušebního trnu ve vzorku NM jako rovnoměrně zpožděný. Především hodnoty hloubek vniku trnu s , získané postupnou integrací, nevykazují výraznější odchylky ($< 2\%$) od experimentálně zjištěných údajů.

- Měřením průběhu $a(t)$ byly odhaleny některé jevy, ke kterým dochází v průběhu vnikání trnu do NM. Jak je vidět na obr. 3 a 4, při pronikání trnu do PP 75/25 a Ž-20 dochází k odpružování (minirelaxaci). Ve zmíněných diagramech průběhu zbrzdění trnu se tento jev projevil pilovitým charakterem křivek $a(t)$.³
- K potvrzení tohoto jevu byly vyrobeny nové bloky NM a měření bylo opakováno. Výsledky opakované zkoušky rovněž potvrdily vznik popisovaného jevu.
- U materiálu PL s vyšší dynamickou viskozitou η tento jev téměř nenastal (viz obr. 5).⁴

ZÁVĚR

Metodika hodnocení NM založená na reologickém modelu nenewtonské kapaliny umožňuje hodnocení vlastností NM (substitucí) plastické povahy fyzikálními a mechanickými charakteristikami.

I když tyto charakteristiky nejsou svými hodnotami absolutní a dobře srovnatelné s hodnotami charakteristik získaných jinými zkouškami, umožňují vzájemné porovnání NM a současně také určit hloubkou vniku trnu i při vyšších dopadových rychlostech. Na základě experimentálně zjištěných hloubek vniku malorázových střel do NM, mohou být stanoveny součinitelé tvaru i_n těchto střel a jejich porovnáním s tvarem zkušebního trnu

³ Ve větší míře se minirelaxace projevuje v důsledku vyšší viskozity η u směsi PP 75/25 než u Ž-20.

⁴ K jediné anomálii průběhu $a(t)$ u PL došlo při pádové výšce závaží $h=1,2\text{ m}$ (viz obr. 6). Tuto anomálii má na svědomí přítomnost vzduchové mezery v místě vpichu (PL-10, žlutá křivka). Tato nehomogenita materiálu zkušebního vzorku vznikla při mechanickém páchování plastelíny do dřevěné rozebratelné formy.

tak predikovat jejich průbojný účinek (hloubku vniku) v živé tkáni jako homogenní biologický systém.

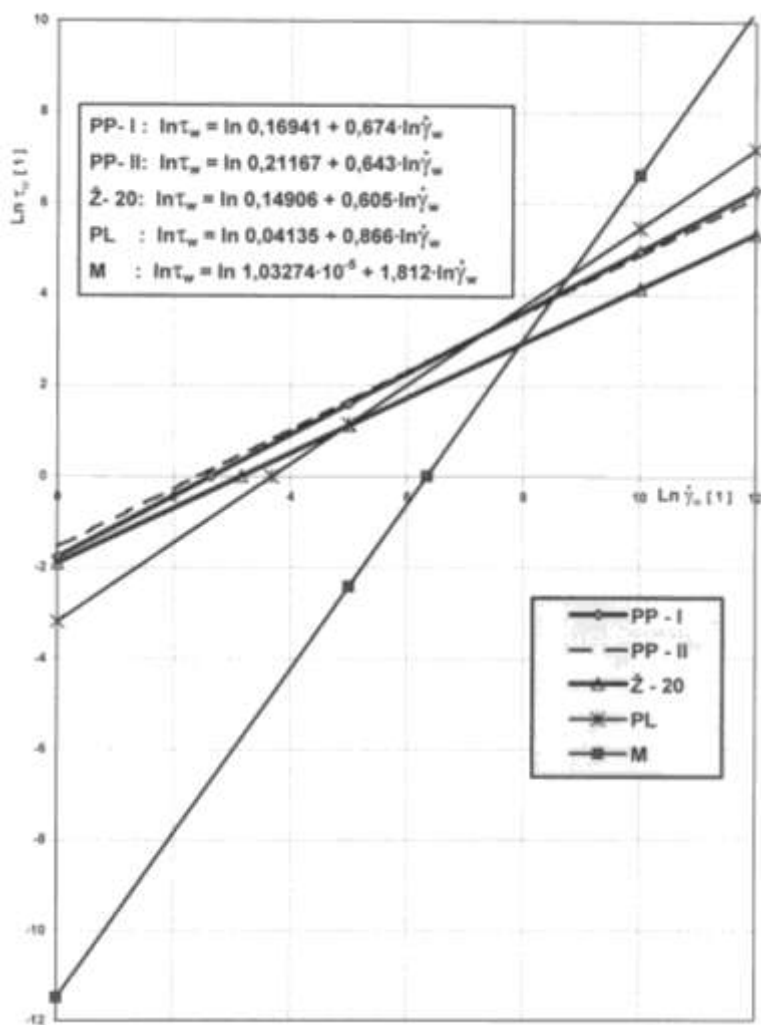
Experimentální výsledky provedené s balistickou želatinou (Ž-20) a především s vepřovým masem (M) jsou nejméně přesné (trn proniká do vzorku i při statickém zatížení) a jsou proto pouze orientační. I tak může být považována hodnota středního odporu $R_{stř}$ želatiny (Ž-20) bližší masu (M) než je tomu u směsi PP 75/25.

Významnou výhodou experimentálního využití Ž-20 při zkoumání balistických jevů spojených s účinky malorážových střel je její průhlednost, která umožňuje vizuální sledování dočasných změn v místě střelného kanálu a jeho blízkého okolí. Toto je ovšem spojeno se značnými finančními náklady (ke sledování

dějů spojených s tvorbou dočasné dutiny a chováním střely při jejím pronikání NM je nutné použití vysokorychlostní kamery ve spojení s měřícím počítačem a dalším příslušenstvím pro kvantifikované hodnocení okamžitých změn).

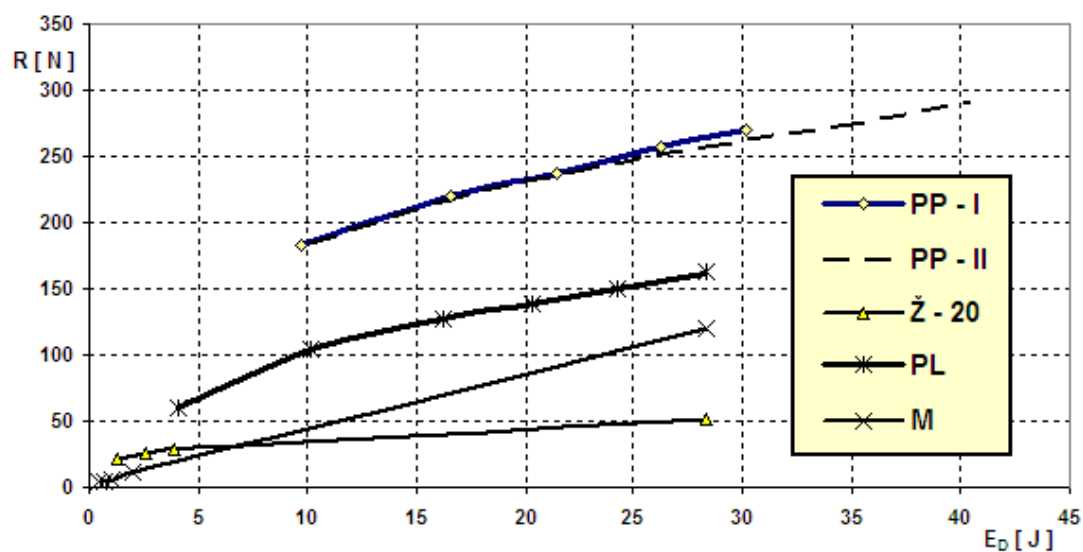
Pro případný popis vlastností NM typu balistická želatina bude v budoucnu nutné odvození matematického modelu substituce **pružně-plastické** povahy.

Proto pro další střelecké zkoušky bude jako substitute živé tkáně použita výrazně levnější směs PP 75/25 a model hodnocení účinků malorážových střel bude založen na rozměrovém a tvarovém posouzení trvalých změn (geometrii) střelného kanálu (trvalé dutiny).



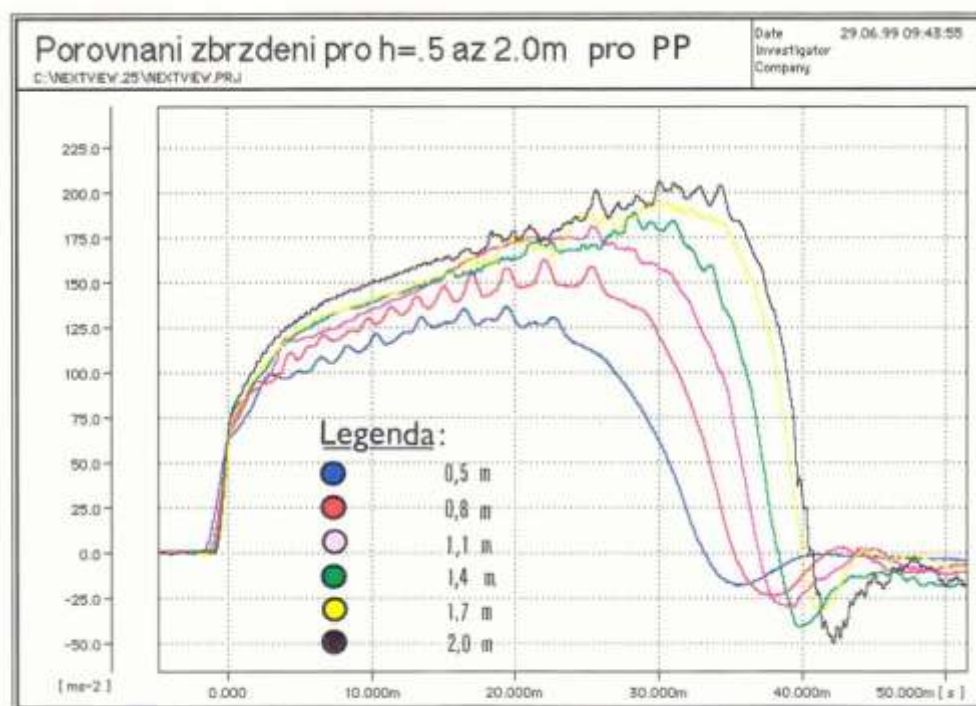
Zdroj: (PLÍHAL, B., JURÍČEK, L., 1999)

Obrázek 1. Diagram logaritmických křivek tečení.



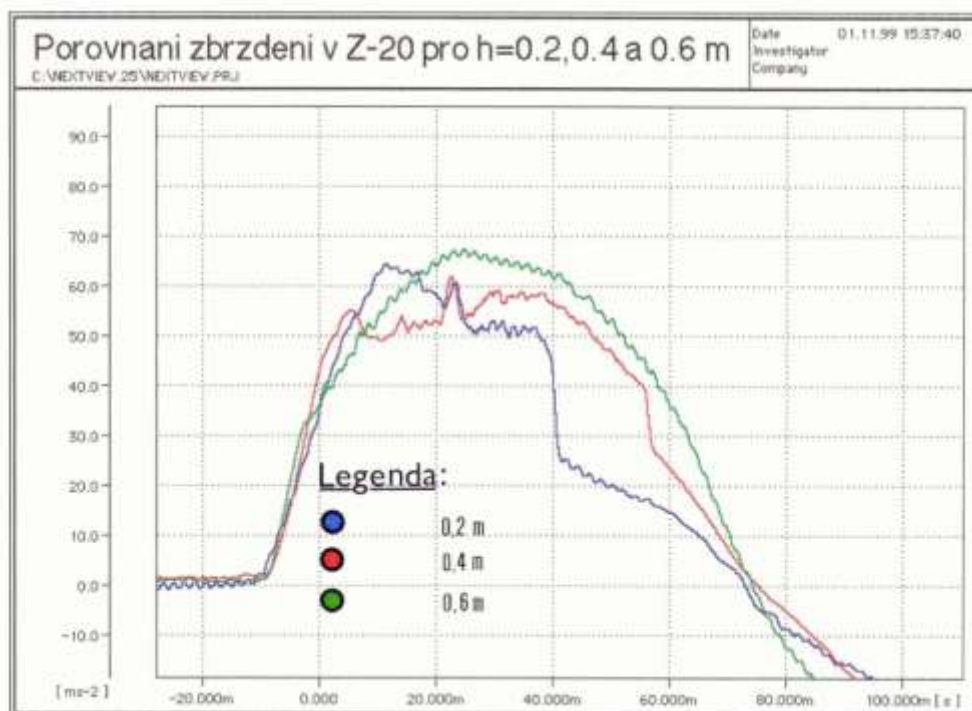
Zdroj: (PLÍHAL, B., JURÍČEK, L., 1999)

Obrázek 2. Diagram průběhů střední odporové síly R zkoumaných NM v závislosti na úrovni kinetické energie E_D zkušebního trnu.



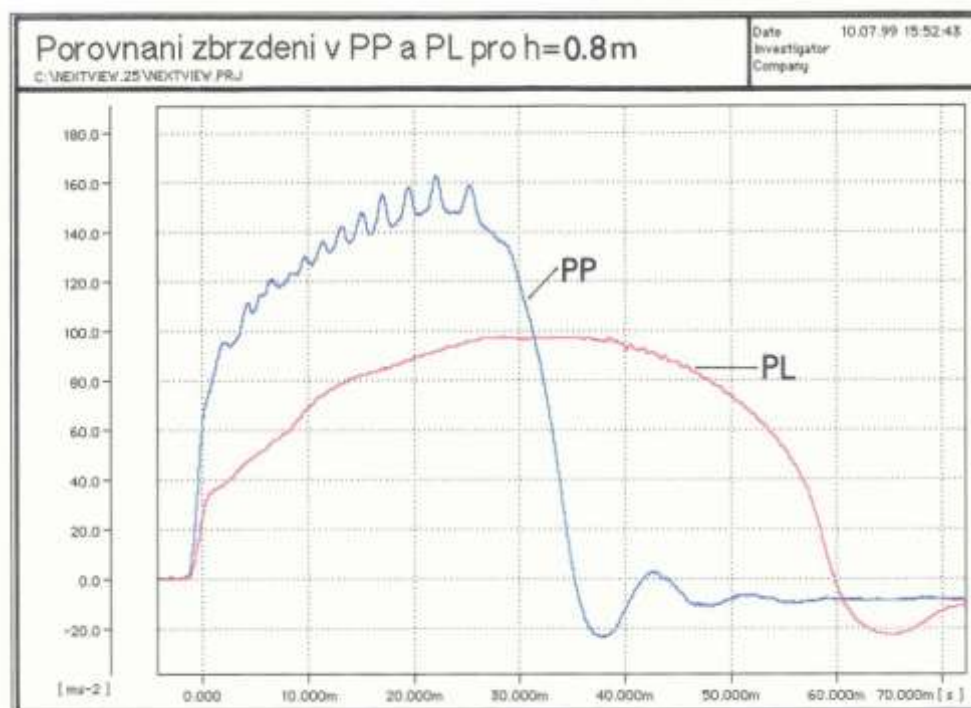
Zdroj: (PLÍHAL, B., JURÍČEK, L., 1999)

Obrázek 3. Diagram porovnání zbrzdění zkušebního trnu v PP 75/25, pro pádové výšky $h = 0,5$ až 2 m.



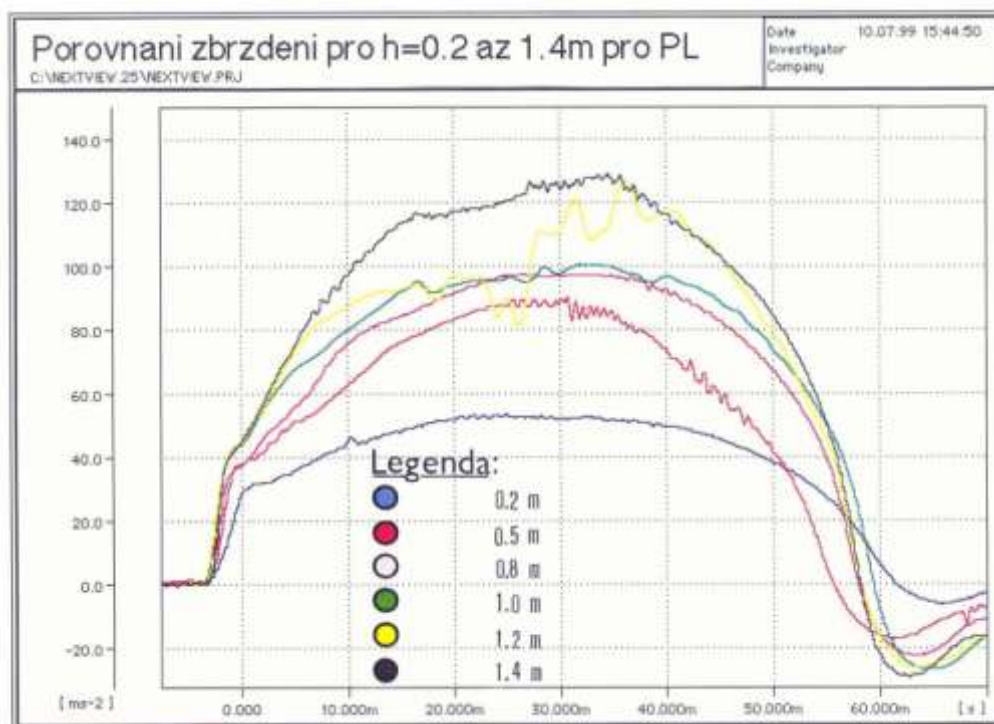
Zdroj: (PLÍHAL, B., JUŘÍČEK, L., 1999)

Obrázek 4. Diagram porovnání zbrzdění zkušebního trnu v Ž-20, pro pádové výšky $h = 0,2$ až $0,6$ m.



Zdroj: (PLÍHAL, B., JUŘÍČEK, L., 1999)

Obrázek 5. Diagram porovnání zbrzdění zkušebního trnu v PP 75/25 a PL, pro pádovou výšku $h = 0,8$ m.



Zdroj: (PLÍHAL, B., JUŘÍČEK, L., 1999)

Obrázek 6. Diagram porovnání zbrzdění zkušebního trnu v PL, pro pádové výšky $h = 0,2$ až $1,4$ m.

(Anomálie průběhu zbrzdění, při pádové výšce zkušebního trnu $h = 1,2$ m. PL-10, žlutá křivka).

LITERATURA

- [1] SELLIER, K., KNEUBÜHL, B.: *Wundballistik und ihre ballistischen Grundlagen*. Berlín: Springer- Verlag, Berlin 2000.
- [2] LEEMING, D.: *Wound Ballistics*. RMCS Shrivenham. Ballistic course (unpublished) 1998.
- [3] PLÍHAL, B.: *Metody vyšetřování reologických charakteristik TPH*, část: Hodnocení tokových charakteristik plastických materiálů - vytlačovací plastometr. Habilitační práce. Brno: VA Brno, 1991.
- [4] PLÍHAL, B., JUŘÍČEK, L.: *Modelování náhradního materiálu živé tkáně pro zkoušky ranivé balistiky*. VTÚ VM Slavičín, 1999.
- [5] JUŘÍČEK, L.: *Simulace a hodnocení účinků malorážových střel na živou sílu*. Doktorská disertační práce. Brno: VA Brno, 2000.
- [6] JURKÁČEK, B.: *Návrh metodiky zjišťování a vyhodnocování účinků malorážových střel na živou sílu*. Brno: VVÚ ZVS Brno, 1984.
- [7] HIRT, M.: *Střelná poranění v soudním lékařství*. Brno: LF MU Brno, 1996.
- [8] JUŘÍČEK, L., KOMENDA, J.: *Náhradní materiály biologických tkání pro zkoušky ranivé balistiky*. IX. Pražský chirurgický den. UK Praha, 1999.
- [9] JUŘÍČEK, L.: *Náhradní materiály pro zkoušky ranivé balistiky*. Střelecká revue č. 5-7. Praha, 2001.
- [10] ČSN 395360: Zkoušky odolnosti ochranných prostředků. Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním. Technické požadavky a zkoušky. ČSNI Praha, 1995.
- [11] ČSN 657150: Petrolát. Praha: ČSNI, 1955.
- [12] ČSN 657101: Parafíny. Praha: ČSNI, 1960.