

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Přípravy prototypů pro ověření reprodukovatelnosti výroby nulté série vyvinutých prototypů

v rámci experimentálního vývoje a průmyslového výzkumu
projektu

CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0024291

Výzkum a vývoj vysoce odolných hybridních laminátů

Záměrem projektu je prostřednictvím aktivit průmyslového výzkumu
i experimentálního vývoje vyvinout vysoce odolné hybridní lamináty
představujících kombinaci speciálních vlastností.



EVROPSKÁ UNIE

Evropský fond pro regionální rozvoj

OP Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU



Vojenský výzkumný ústav, s. p.

Veslařská 337/230, 637 00 Brno

IČ: 29372259 ID datové schránky: n62kuhr
DIČ: CZ29372259 www.vvubrno.cz Tel.: +420 543 562 101
vvu@vvubrno.cz
Zapsán v obchodním rejstříku u KS Brno, značka A25718

Závěrečná zpráva

Hybridní laminát s balistickou ochranou

Ing. Irena Beránková
Ing. Pavel Čalkovský

Květen 2023

Obsah

1. Úvod	3
2. Fáze 1 – vývoj prototypu - zkoušky prvotních vzorků	3
2.1 Údaje o vzorcích	3
2.2 Provedení zkoušek.....	3
2.3 Výsledky.....	4
3. Fáze 2 – vývoj prototypu - zkoušky perspektivních vzorků	7
3.1 Údaje o vzorcích	7
3.2 Provedení zkoušek.....	8
3.3 Výsledky.....	8
4. Fáze 3 – testování prototypu	13
4.1 Údaje o vzorcích	13
4.2 Provedení zkoušek.....	13
4.3 Výsledky.....	14
5. Finální řešení.....	16
6. Seznam příloh	17

1. Úvod

Cílem průmyslového výzkumu a experimentálního vývoje bylo vyvinout hybridní laminát s balistickou ochranou. Úroveň balistické ochrany materiálů byla sledována na základě výsledků *balistické limitní rychlosti* V_{50} , která je definována jako dopadová rychlost, při které se za použití uvedeného projektilu předpokládá, že 50 % nástřelů způsobí úplný průraz (průstřel) materiálu a 50 % nástřelů částečný průraz (neprůstřel) materiálu.

2. Fáze 1 – vývoj prototypu - zkoušky prvotních vzorků

Ve fázi 1 byly uskutečněny zkoušky 6 vzorků laminátů, na základě kterých byly získány základní informace o balistických parametrech základních vzorků bez funkčních materiálů (vz. č. 1 až 4) a vzorků hybridních laminátů s čedičovým a keramickým vláknem (Laminát 04 a Laminát 06). Vzorky byly připraveny firmou OMB composites EU a. s.

2.1 Údaje o vzorcích

Parametry a složení vzorků laminátů jsou uvedeny v *tabulce 1*.

Tabulka 1: Parametry a složení prvotních vzorků laminátů

Označení vzorku	Rozměr vzorku [mm]	Plošná hmotnost vzorku AW [kg.m ⁻²]	Složení vzorku
vz. č. 1	400 x 400 x 3,8	5,6	gelcoat OLDOPAL S250 V pryskyřice RESOLTECH 1200 emulzní rohož ze sekaných vláken BN 450 g/m ² (3 vrstvy)
vz. č. 2	400 x 400 x 3,8	5,8	gelcoat OLDOPAL S250 V pryskyřice RESOLTECH 1200 emulzní rohož ze sekaných vláken BN 450 g/m ² (3 vrstvy)
vz. č. 3	400 x 400 x 4,6	5,7	gelcoat OLDOPAL S250 V pryskyřice RESOLTECH 1200 emulzní rohož ze sekaných vláken BN 450 g/m ² (1 vrstva)
vz. č. 4	400 x 400 x 3,5	4,0	gelcoat OLDOPAL S250 V pryskyřice RESOLTECH 1200 emulzní rohož ze sekaných vláken BN 450 g/m ² (1 vrstva)
Laminát 04	301 x 212 x 3,3	5,2	bazaltová tkanina BB-250-100 keramická příze AVKOTHERM 62 C bazaltová tkanina BB-250-100
Laminát 06	301 x 212 x 4,3	6,5	emulzní rohož ze sekaných vláken BN 450 g/m ² keramická příze AVKOTHERM 62 C bazaltová tkanina BB-250-100

2.2 Provedení zkoušek

Pro získání balistických parametrů byly provedeny střelecké zkoušky metodou stanovení *balistické limitní rychlosti* V_{50} , která je jednou z nejpoužívanějších metod hodnocení balistické odolnosti materiálů.

Zkoušky *balistické limitní rychlosti* V_{50} byly provedeny podle normy STANAG 2920, Ed. 2, a to 6 platnými nástřely (3 průstřely a 3 neprůstřely), které splňují podmínku, že rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší dopadovou rychlostí nástřelu je maximálně $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vzorky byly podrobeny střeleckým zkouškám při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ projektilem simulujícím střepinu FSP ráže .22 o hmotnosti $(1,102 \pm 0,02) \text{ g}$ s nosičem (druh F5) ze zbraně ráže $7,62 \times 25 \text{ mm}$ ze vzdálenosti 5 m.

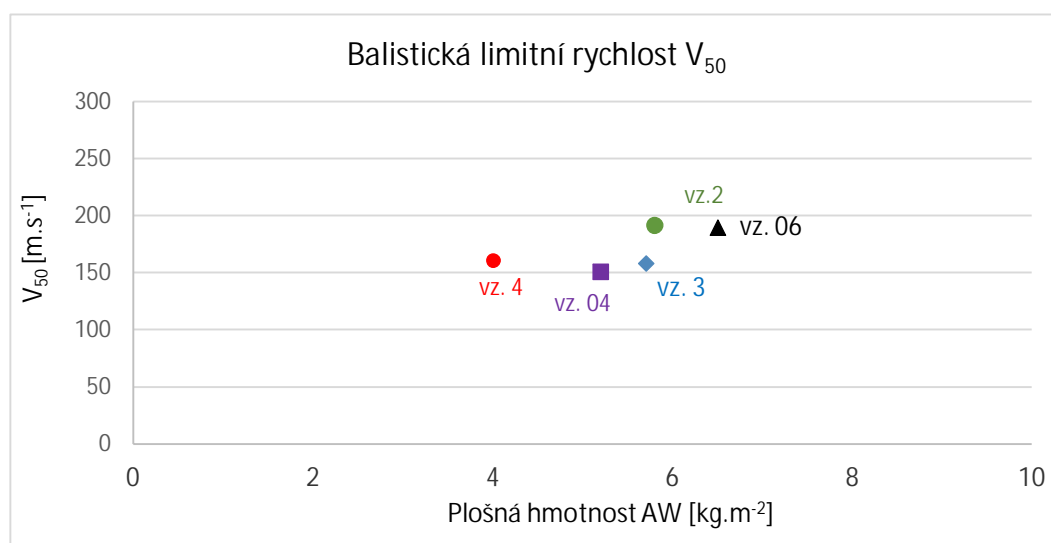
2.3 Výsledky

Výsledky zkoušek byly souhrnně zapsány do *tabulky 2*, graficky znázorněny na *obr. 1 a 2*.

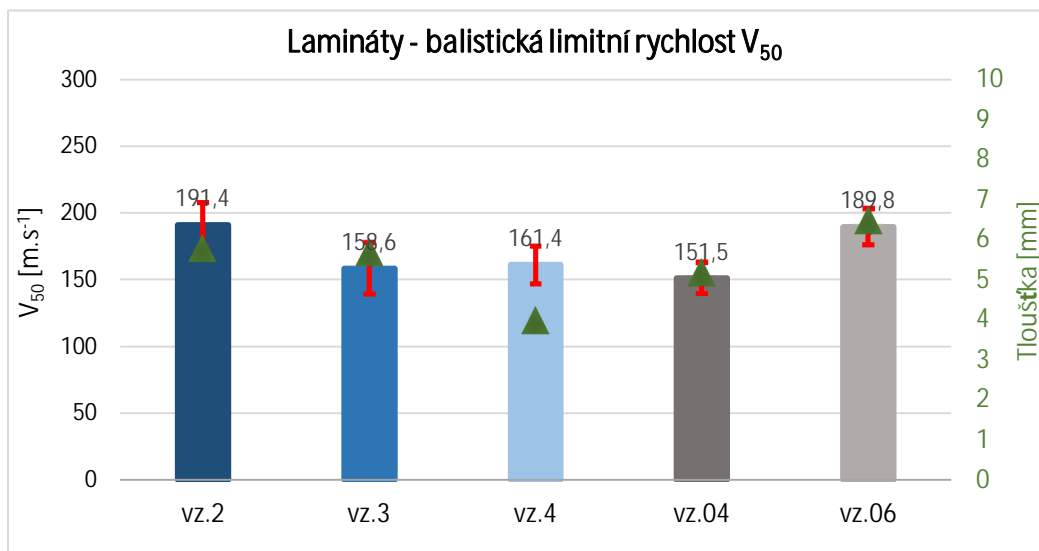
Tabulka 2: Souhrnné výsledky balistické limitní rychlosti V_{50} prvotních vzorků laminátů

Označení vzorku	Označení vzorku v grafech	Plošná hmotnost vzorku AW [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]	Balistická limitní rychlost V_{50} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
vz. č. 1	-	5,6	nelze stanovit ¹⁾
vz. č. 2	vz.2	5,8	$191,4 \pm 15,0$
vz. č. 3	vz.3	5,7	$158,6 \pm 29,1$
vz. č. 4	vz.4	4,0	$161,4 \pm 35,6$
Laminát 04	vz.04	5,2	$151,5 \pm 12,7$
Laminát 06	vz.06	6,5	$189,8 \pm 16,1$

1) nestabilita projektilu při nástřelech

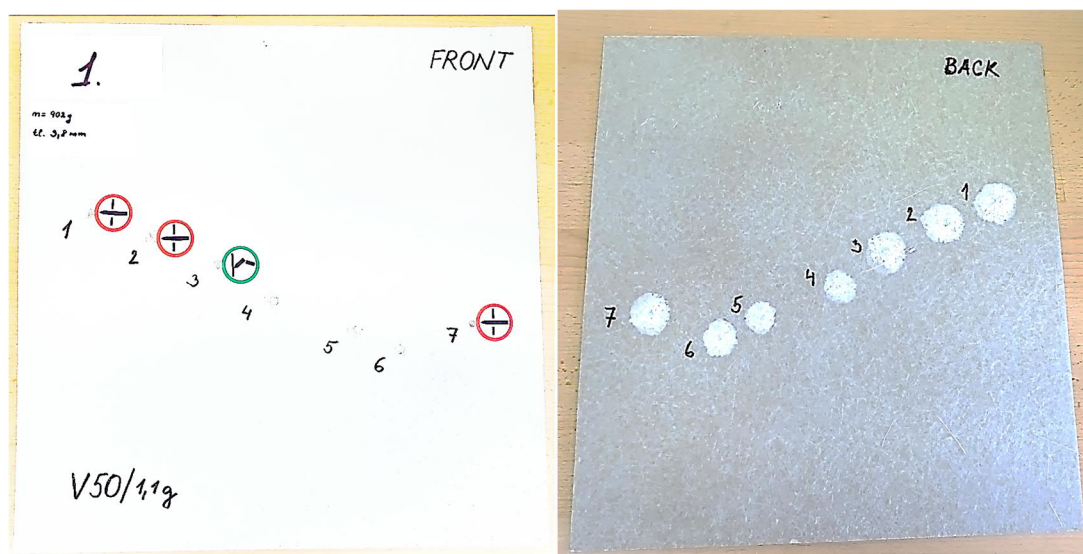


Obr. 1: Grafická závislost balistické limitní rychlosti V_{50} na plošné hmotnosti prvotních vzorků laminátů

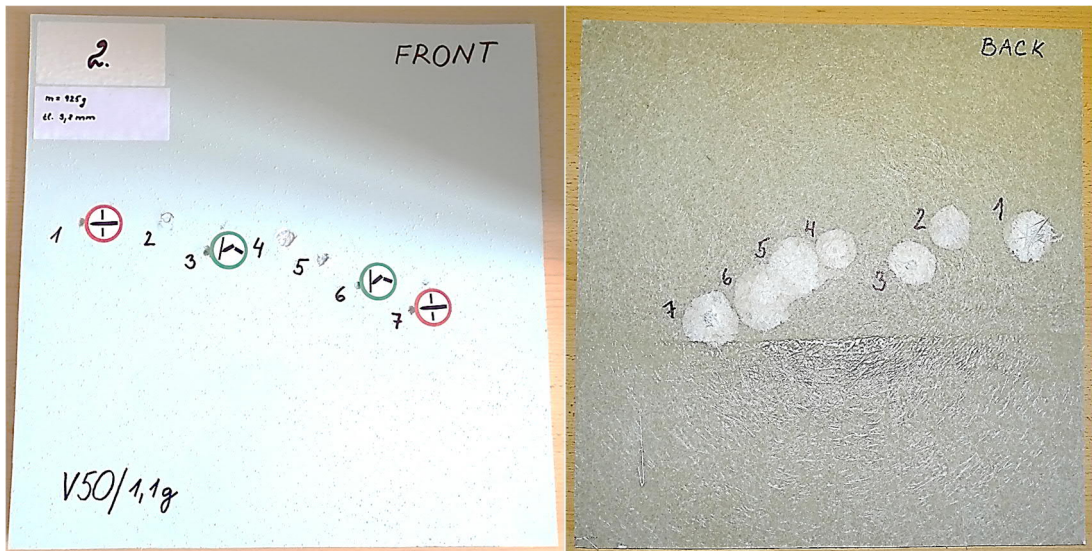


Obr. 2: Porovnání balistických limitních rychlostí prvotních vzorků laminátů

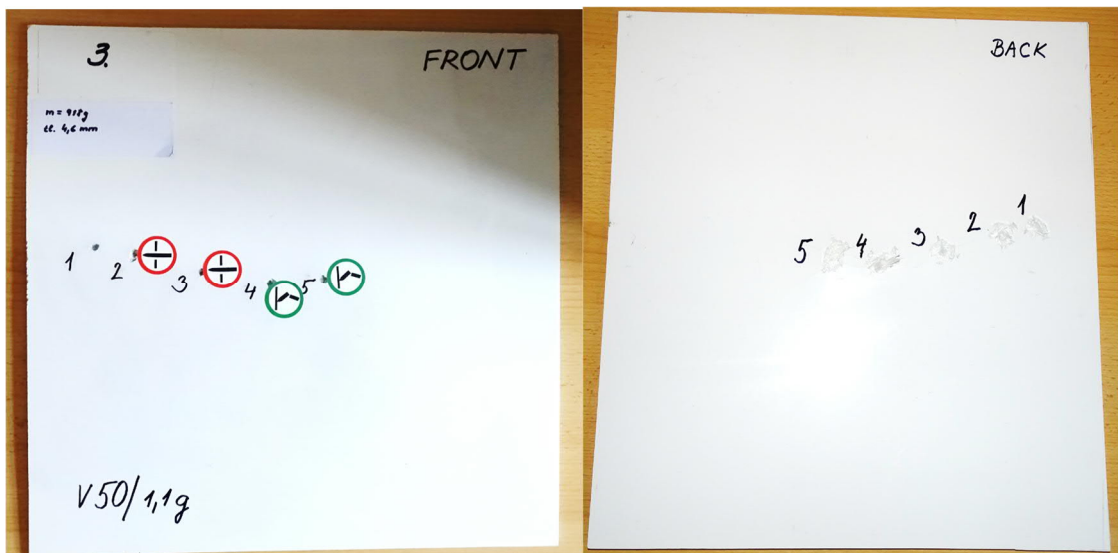
Vzorky po střeleckých zkouškách jsou zobrazeny na obr. 3 až obr. 8.



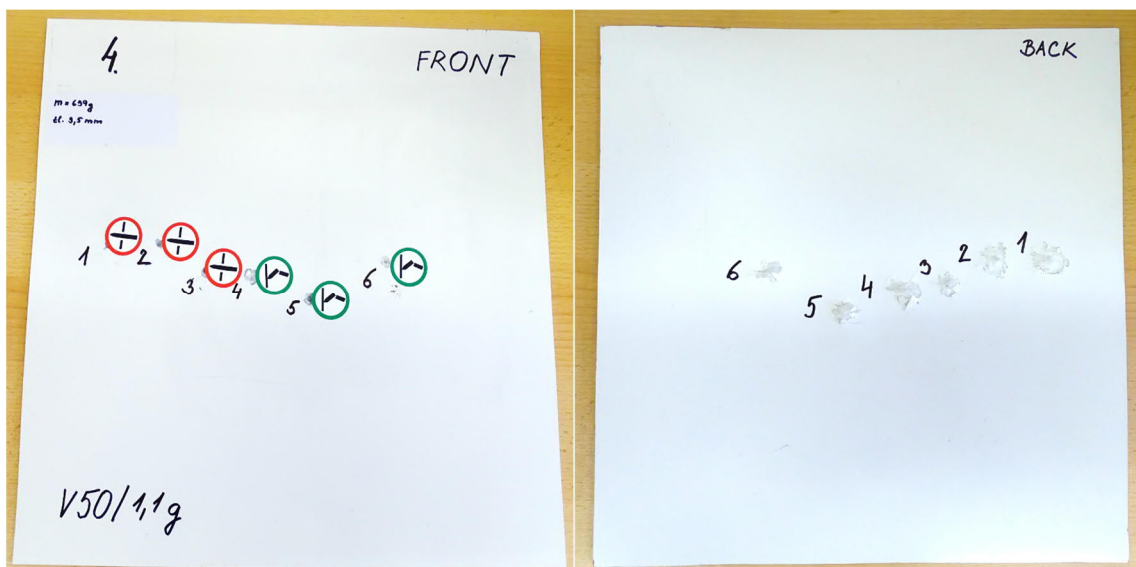
Obr. 3: Vzorek č. 1 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



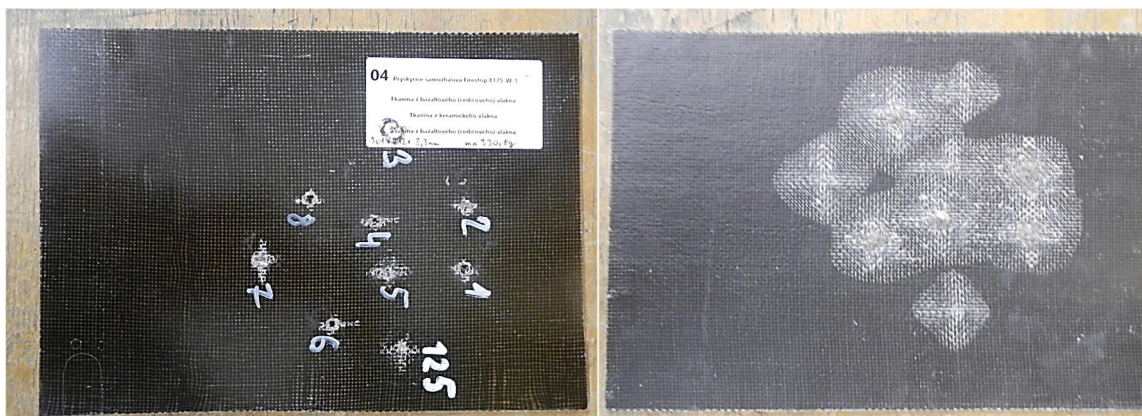
Obr. 4: Vzorek č. 2 po střelecké zkoušce stanovení V₅₀



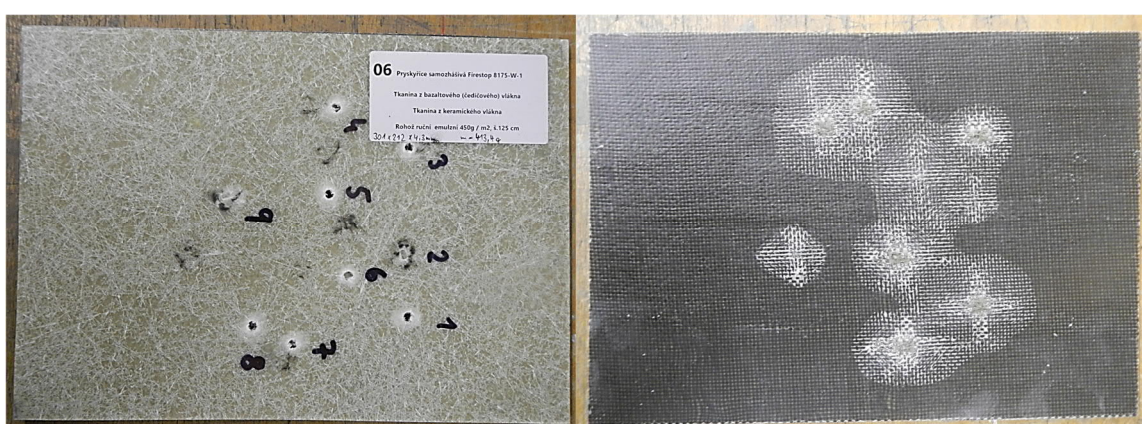
Obr. 5: Vzorek č. 3 po střelecké zkoušce stanovení V₅₀



Obr. 6: Vzorek č. 4 po střelecké zkoušce stanovení V₅₀



Obr. 7: Vzorek Laminát 04 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



Obr. 8: Vzorek Laminát 06 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}

Podrobněji jsou zkoušky popsány v Příloze 1.

3. Fáze 2 – vývoj prototypu - zkoušky perspektivních vzorků

Ve fázi 2 bylo firmou OMB composites EU a. s. připraveno 7 vzorků hybridních laminátů.

3.1 Údaje o vzorcích

Parametry a složení vzorků hybridních laminátů jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry a složení perspektivních vzorků hybridních laminátů

Označení vzorku	Rozměr vzorku [mm]	Plošná hmotnost vzorku AW [kg.m ⁻²]	Složení vzorku
20200720 0001	400 x 400 x 7,7	12,2	hybridní tkanina HT-BA 220-100-D1 (3 vrstvy) bazaltová tkanina BB-250-100 (18 vrstev) tkanina aramid STYLE 281 (2 vrstvy) tkanina 19.12.01 - CETRIKO (1 vrstva)
20200720 0002	400 x 400 x 7,9	12,2	tkanina aramid STYLE 281 (2 vrstvy) bazaltová tkanina BB-250-100 (16 vrstev)

			hybridní tkanina HT-BA 220-100-D1 (5 vrstev) tkanina 19.12.01 - CETRIKO (1 vrstva)
20200805 0003	400 x 400 x 8,2	10,9	tkanina aramid STYLE 281 (6 vrstev) bazaltová tkanina BB-250-100 (7 vrstev) keramická příze AVKOTHERM 62 C (1 vrstva) tkanina 19.12.01 - CETRIKO (1 vrstva)
20201204 0004 MAGN. CLON.*	320 x 320 x 8,9	11,1	tkanina aramid STYLE 281 (11 vrstev) hybridní tkanina HT-BA 220-100-D1 (12 vrstev) EMC tkanina H94 (2 vrstvy)
20201204 0005	400 x 400 x 8,5	11,1	hybridní tkanina HT-BA 220-100-D1 (12 vrstev) tkanina aramid STYLE 281 (11 vrstev) pryskyřice RESOLTECH 1200
20201217 0006 No.1*	400 x 250 x 8,8	10,9	bazaltová tkanina 400 g/m ² (12 vrstev) bazaltová tkanina 600 g/m ² (1 vrstva)
20201217 0007 No.2*	400 x 250 x 9,0	11,1	bazaltová tkanina 600 g/m ² (11 vrstev)

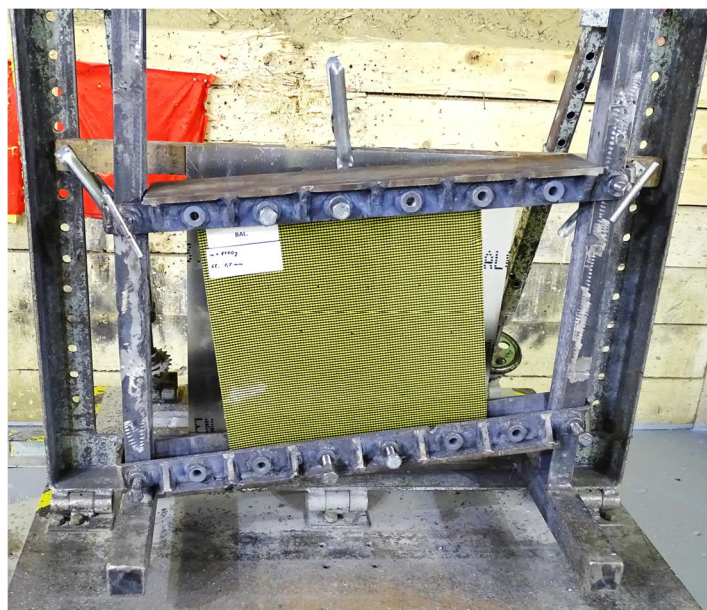
*při současném využití vzorků pro jiné zkoušky byly vzorky pro střelecké zkoušky v menším plošném rozměru

3.2 Provedení zkoušek

Pro získání balistických parametrů byly provedeny střelecké zkoušky metodou stanovení *balistické limitní rychlosti* V_{50} , která je jednou z nejpoužívanějších metod hodnocení balistické odolnosti materiálů.

Zkoušky *balistické limitní rychlosti* V_{50} byly provedeny podle normy STANAG 2920, Ed. 2, a to 6 platnými nástřely (3 průstřely a 3 neprůstřely), které splňují podmínku, že rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší rychlostí nástřelu je maximálně 40 m.s⁻¹.

Vzorky byly podrobeny střeleckým zkouškám při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ projektilem simulujícím střepinu FSP ráže .22 o hmotnosti $(1,102 \pm 0,02)$ g s nosičem (druh F5) ze zbraně ráže 7,62 x 25 mm ze vzdálenosti 5 m.



Obr. 9: Ukázka upevnění vzorku při střeleckých zkouškách

3.3 Výsledky

Výsledky zkoušek vzorků hybridních laminátů byly souhrnně zapsány do *tabulky 4*.

Podílem *balistické limitní rychlosti* V_{50} a *plošné hmotnosti* AW byl definován *balistický hmotnostní koeficient* K , na základě kterého lze porovnat lamináty nejen z hlediska balistické účinnosti, ale rovněž z hlediska jejich plošné hmotnosti, jelikož i nízká hmotnost produktu je častým požadavkem zákazníka. To znamená, že čím je hodnota *koeficientu* K vyšší, tím má laminát vyšší užité vlastnosti a splňuje parametry pro širší oblast využití v různých vojenských nebo civilních aplikacích.

Balistický hmotnostní koeficient byl tedy vypočítán ze vztahu:

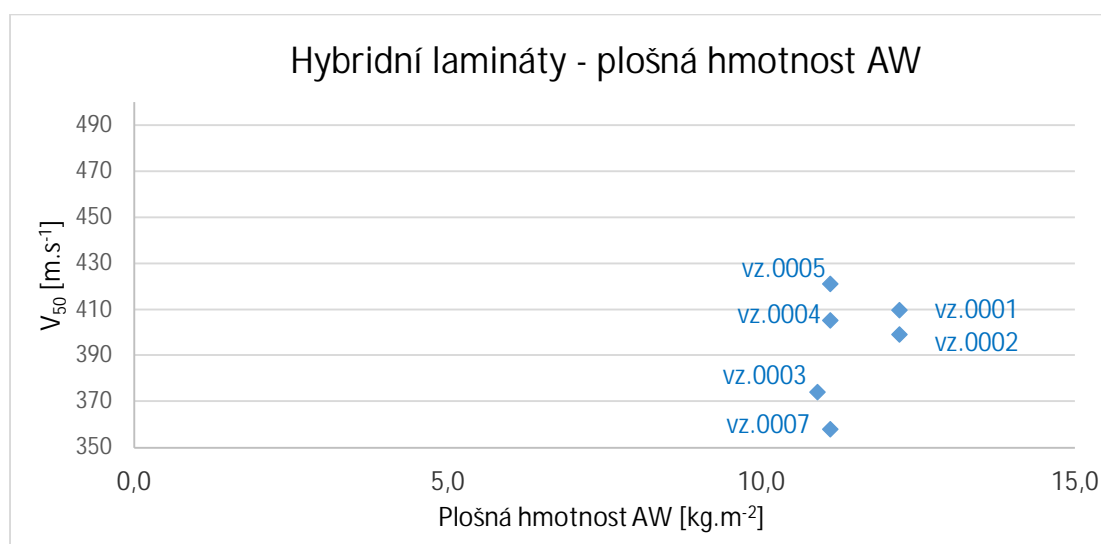
$$K = V_{50} / AW \quad [m \cdot s^{-1} / kg \cdot m^{-2}]$$

kde V_{50} je balistická limitní rychlost v $[m \cdot s^{-1}]$ a AW je plošná hmotnost v $[kg \cdot m^{-2}]$.

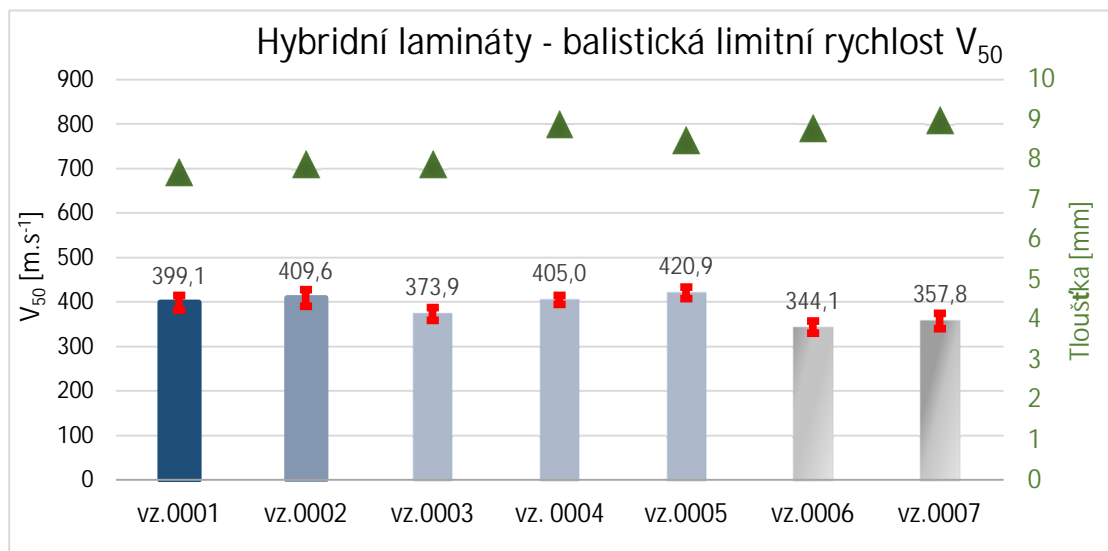
Tabulka 4: Souhrnné výsledky V_{50} a K hybridních laminátů a porovnání s výsledky balistických laminátů

Označení vzorku	Označení vzorku v grafech	Plošná hmotnost vzorku AW [$kg \cdot m^{-2}$]	Balistická limitní rychlost V_{50} [$m \cdot s^{-1}$]	Balistický hmotnostní koeficient K [$m \cdot s^{-1} / kg \cdot m^{-2}$]
vz.20200720 0001	vz.0001	12,2	$399,1 \pm 16,5$	32,7
vz.20200720 0002	vz.0002	12,2	$409,6 \pm 19,1$	33,6
vz.20200805 0003	vz.0003	10,9	$373,9 \pm 14,2$	34,3
vz.20201204 0004 MAGN. CLON.	vz.0004	11,1	$405,0 \pm 9,7$	36,5
vz.20201204 0005	vz.0005	11,1	$420,9 \pm 12,7$	38,0
vz.20201217 0006 No.1	vz.0006	10,9	$344,1 \pm 14,2$	31,6
vz.20201217 0007 No.2	vz.0007	11,1	$357,8 \pm 16,8$	32,2

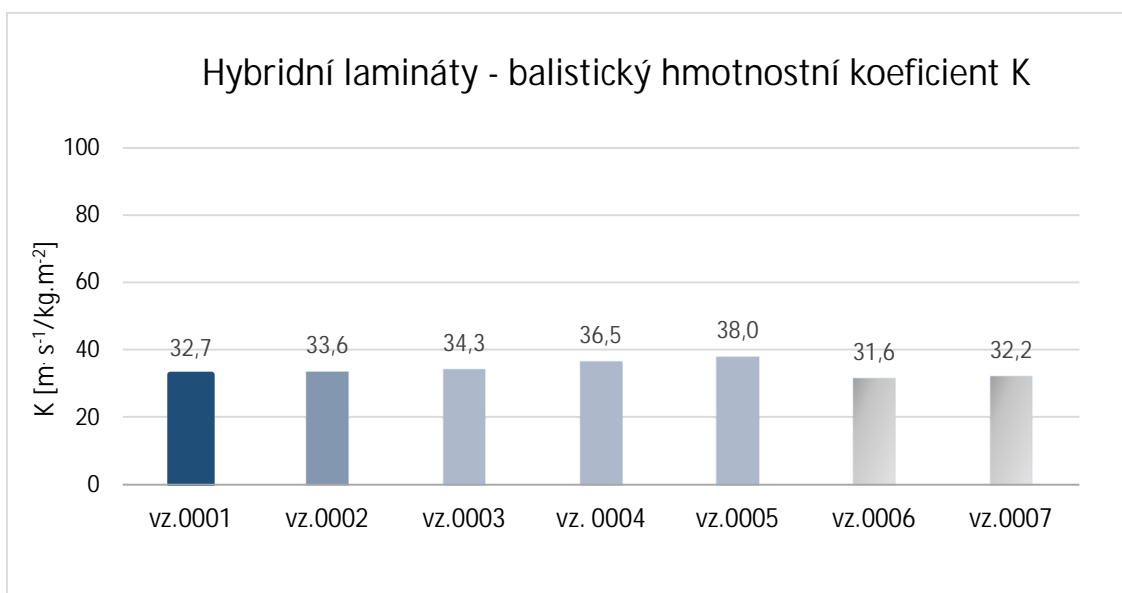
Graficky byly výsledky porovnány na obr. 10. až obr. 12.



Obr. 10: Grafická závislost balistické limitní rychlosti V_{50} na plošné hmotnosti perspektivních vzorků



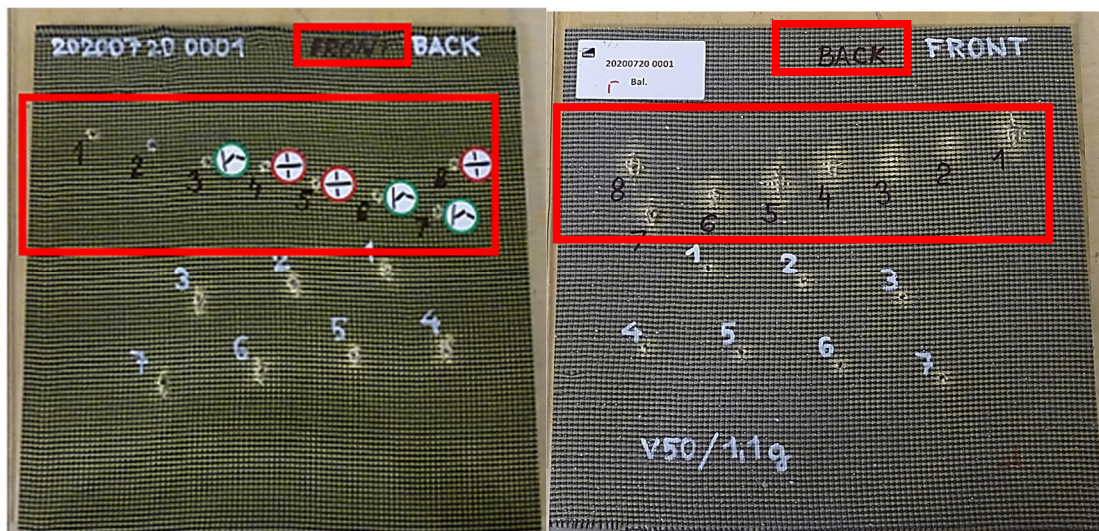
Obr. 11: Balistická limitní rychlost V_{50} perspektivních vzorků



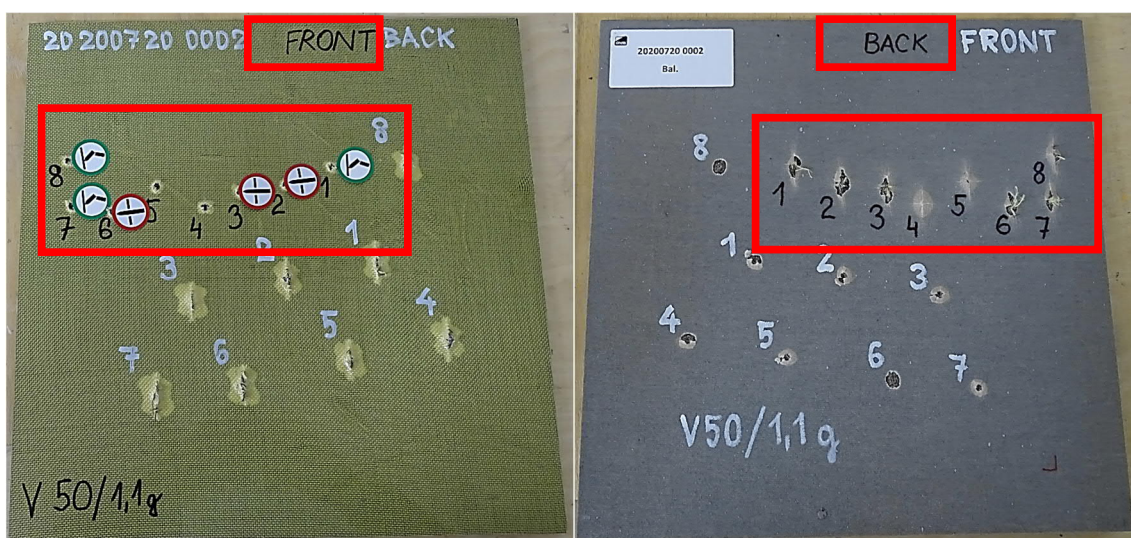
Obr. 12: Balistický hmotnostní koeficient K perspektivních vzorků

Z výsledků zkoušek perspektivních vzorků hybridních laminátů (v grafech označené jako vz. 0001 až vz. 0007) byly zjištěny nejlepší sledované balistické parametry *balistická limitní rychlost V_{50}* a *balistický hmotnostní koeficient K* u vzorku 202012040005 (v grafech označený jako vz. 0005).

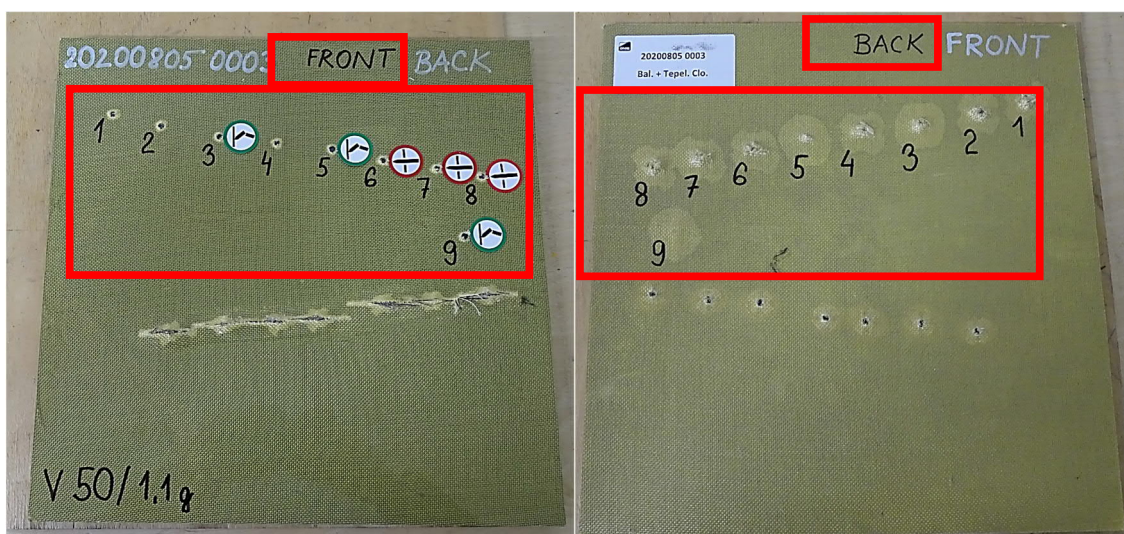
Vzorky po střeleckých zkouškách jsou zobrazeny na obr. 13 až obr. 19.



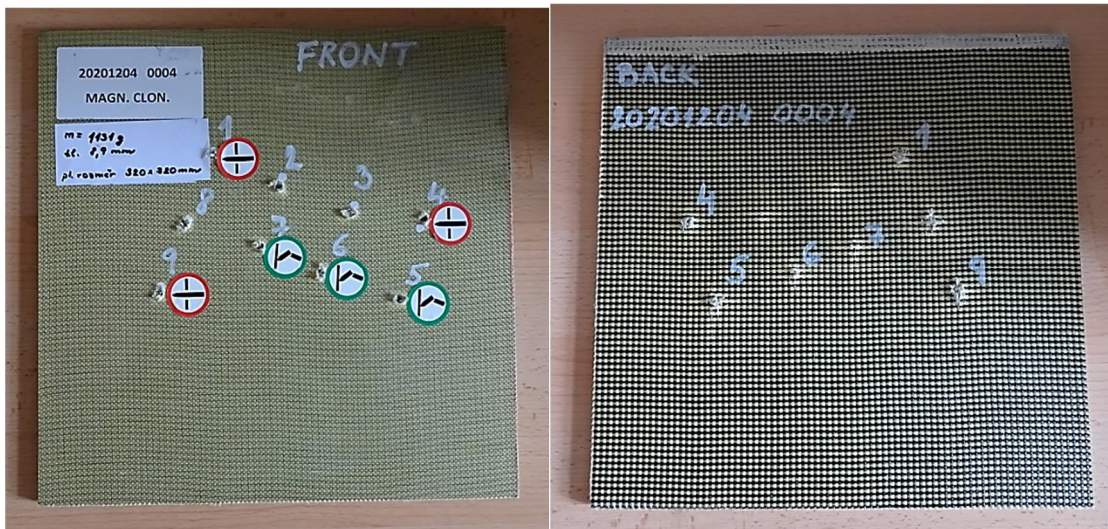
Obr. 13: Vzorek 20200720 0001 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



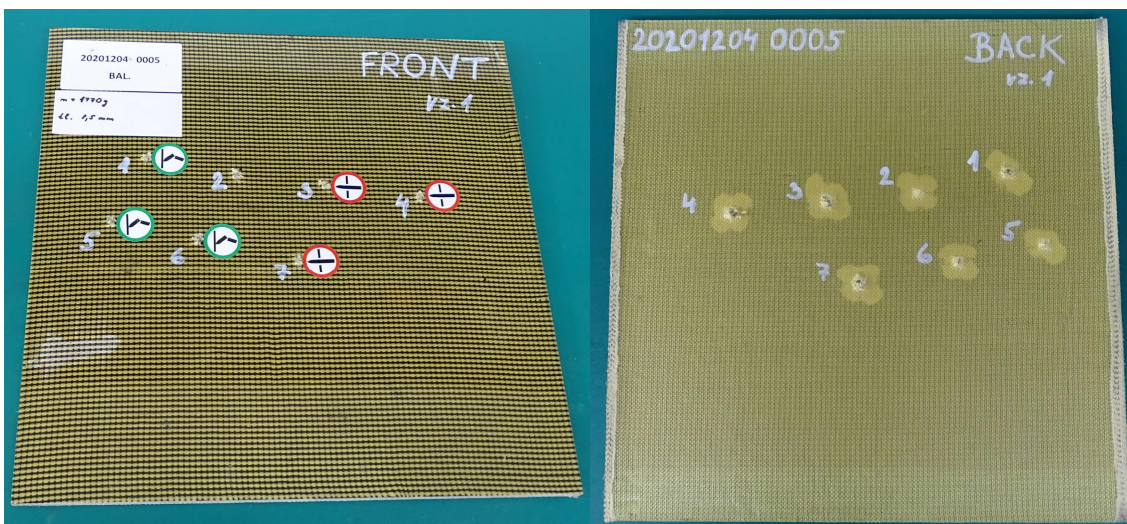
Obr. 14: Vzorek 20200720 0002 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



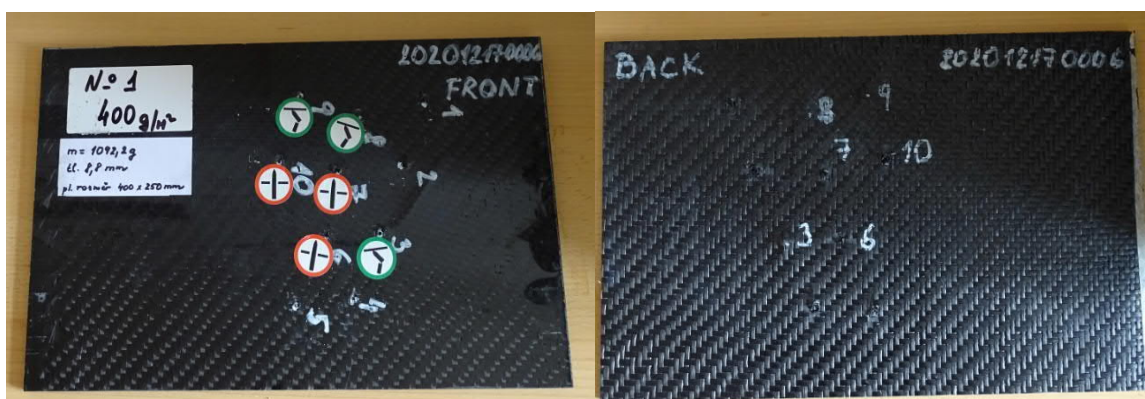
Obr. 15: Vzorek 20200805 0003 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



Obr. 16: Vzorek 20201204 0005 MAGN. CLON. po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



Obr. 17: : Vzorek 20201204 0005 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



Obr. 18: Vzorek 20201217 0006 No. 1 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



Obr. 19: Vzorek 20201217 0007 No.2 po střelecké zkoušce stanovení V_{50}

Podrobněji jsou zkoušky popsány v Příloze 2.

4. Fáze 3 – testování prototypu

Na základě výsledků zkoušek ve fázi 2 bylo pro přípravu prototypu využito složení vzorku 20201204 0005 (vz. 0005), u kterého byly zjištěny nejvyšší hodnoty sledovaných balistických parametrů ze všech zkoušených hybridních laminátů.

Vzorek pro prototyp „hybridního laminátu s balistickou ochranou“ byl připraven OMB composites EU a. s. ve standardní tloušťce komerčně vyráběných laminátových dílů pro automobilový průmysl, na které se specializuje. Pro sledování nárůstu balistických parametrů (balistická limitní rychlost V_{50} a balistický hmotnostní koeficient K) prototypu byl připraven základní - 0. vzorek.

4.1 Údaje o vzorcích

Parametry a složení vzorku prototypu a základního - 0. vzorku jsou uvedeny v *tabulce 5*.

Tabulka 5: Parametry a složení vzorku prototypu a základního - 0. vzorku

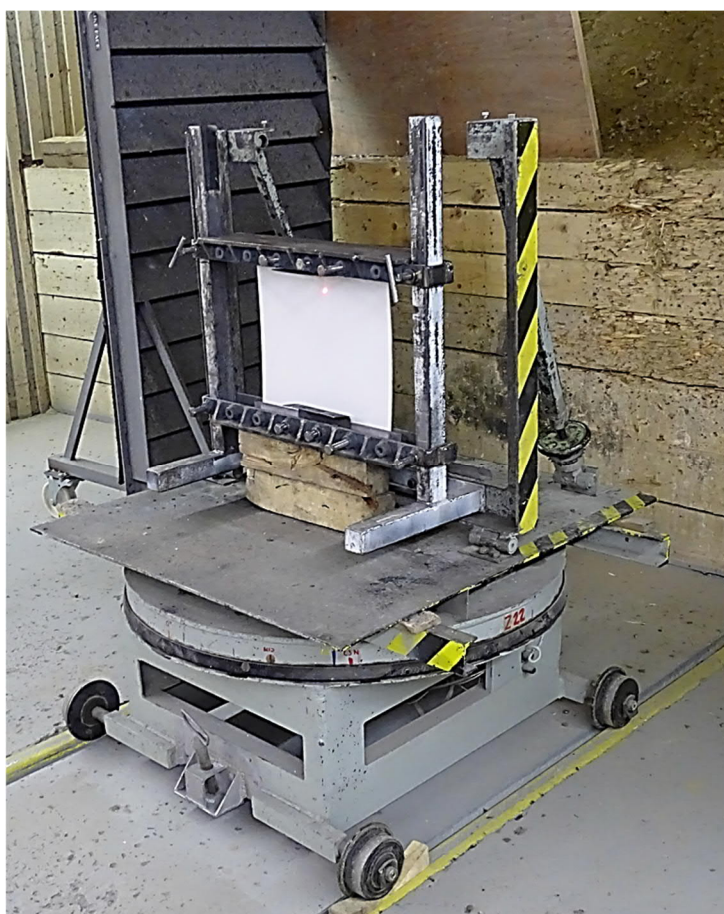
Označení vzorku	Rozměr vzorku [mm]	Plošná hmotnost vzorku AW [kg.m ⁻²]	Složení vzorku
P1	400 x 400 x 4,6	5,6	hybridní tkanina HT-BA 220-100-D1 (8 vrstev) tkanina aramid STYLE 281 (8 vrstev) pryskyřice RESOLTECH 1200
0. vzorek	400 x 400 x 3,8	5,2	emulzní rohož ze sekaných vláken BN 450 g/m ² emulzní rohož ze sekaných vláken BN 450 g/m ² emulzní rohož ze sekaných vláken BN 300 g/m ² pryskyřice FIRESTOP 8175- W-1

4.2 Provedení zkoušek

Pro získání balistických parametrů byly provedeny střelecké zkoušky metodou stanovení *balistické limitní rychlosti* V_{50} , která je jednou z nejpoužívanějších metod hodnocení balistické odolnosti materiálů.

Zkoušky *balistické limitní rychlosti* V_{50} byly provedeny podle normy STANAG 2920, Ed. 2, a to 6 platnými nástřely (3 průstřely a 3 neprůstřely), které splňují podmínku, že rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší rychlostí nástřelu je maximálně $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vzorky byly podrobeny střeleckým zkouškám při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ projektilem simulujícím střepinu FSP ráže .22 o hmotnosti $(1,102 \pm 0,02) \text{ g}$ s nosičem (druh F5) ze zbraně ráže 7,62 x 25 mm ze vzdálenosti 5 m.



Obr. 20: Ukázka upevnění vzorku při střeleckých zkouškách

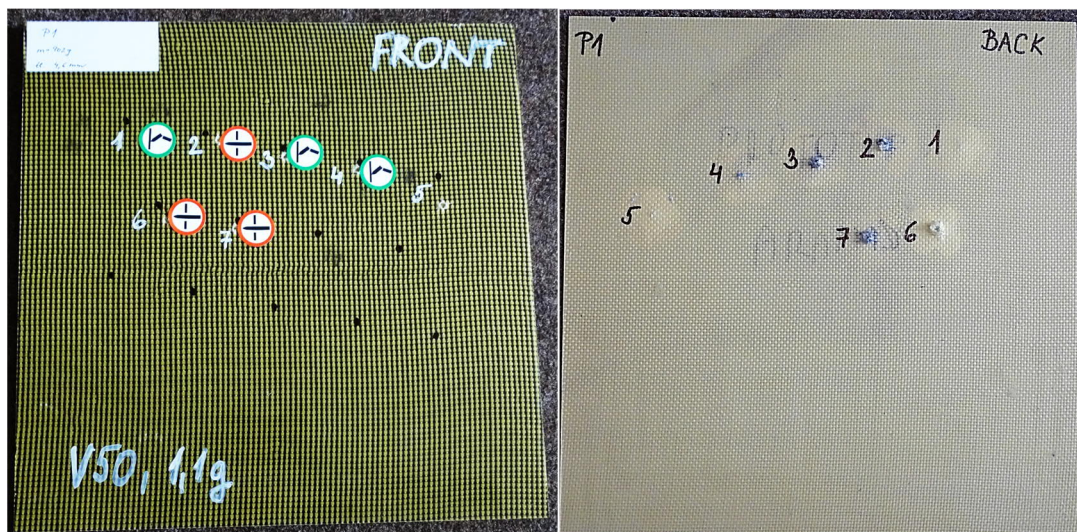
4.3 Výsledky

Výsledky střeleckých zkoušek vzorku prototypu P1 a základního - 0. vzorku jsou uvedeny v *tabulce 6*.

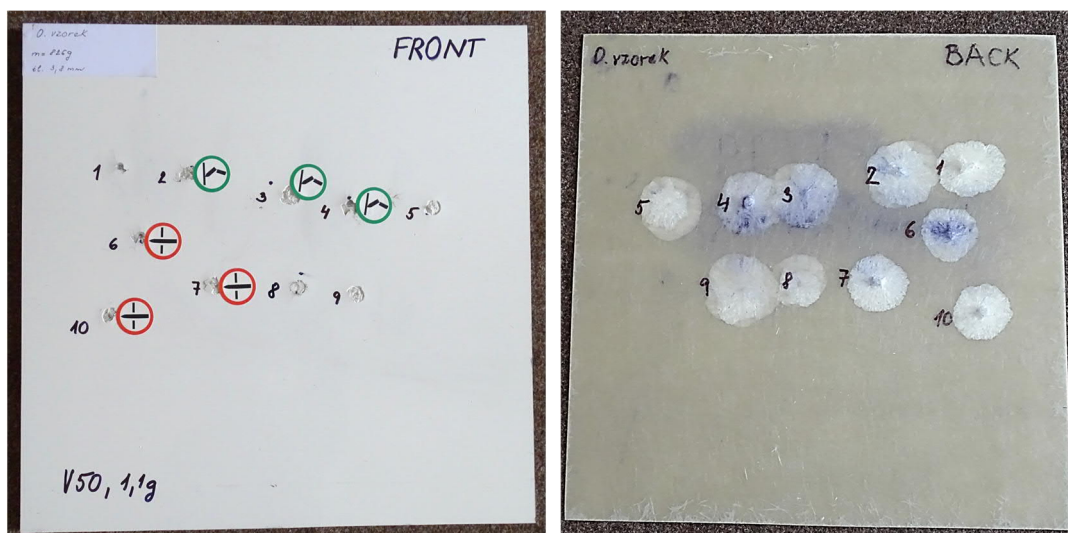
Tabulka 6: Souhrnné výsledky testování vzorku prototypu a základního 0. vzorku

Označení vzorku	Označení vzorku v protokolu	Balistická limitní rychlost V_{50} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Balistický hmotnostní koeficient K [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]	Nárůst parametru V_{50} [%]	Nárůst parametru K [%]
P1	Vzorek č. 4	$259,6 \pm 11,5$	46,4	27,8	18,7
0.vzorek	Vzorek č. 2	$203,2 \pm 9,3$	39,1	-	-

Vzorky po střeleckých zkouškách jsou zobrazeny na *obr. 21 a obr. 22*.



Obr. 21: : Vzorek prototypu po střelecké zkoušce stanovení V_{50}



Obr. 22: Základní - 0. vzorek po střelecké zkoušce stanovení V_{50}

Balistická limitní rychlosti V_{50} vzorku hybridního laminátu s balistickou ochranou je ve srovnání s 0. vzorkem vyšší o 27,8 %.

Balistický hmotnostní koeficient K vzorku hybridního laminátu s balistickou ochranou je ve srovnání s 0. vzorkem vyšší o 18,7 %.

Podrobněji jsou zkoušky popsány v Příloze 3.

5. Finální řešení

PROTOTYP 1 „Hybridní laminát s balistickou ochranou“ má parametry a složení uvedené v tabulce 7.

Tabulka 7: Parametry a složení PROTOTYPU 1 „Hybridní laminát s balistickou ochranou“

PROTOTYP 1 „Hybridní laminát s balistickou ochranou“	Plošná hmotnost vzorku AW [kg.m ⁻²]	Složení vzorku
	5,6	hybridní tkanina HT-BA 220-100-D1 (8 vrstev) tkanina aramid STYLE 281 (8 vrstev) pryskyřice RESOLTECH 1200

Prototyp 1 „Hybridní laminát s balistickou ochranou“ je primárně určen pro zvýšení bezpečnosti osob v civilních dopravních prostředcích vůči rychle letícím fragmentům, které jsou potenciální hrozbou při vzniku mimořádných událostí či nenadálých teroristických činech.

Klíčový úspěch řešení prototypu spočívá především ve zvýšení balistických parametrů *balistické limitní rychlosti* V_{50} o 27,8 % a *balistického hmotnostního koeficientu* K o 18,7 % při současném zachování stávající hmotnosti a tloušťky komerčně vyráběných dílů OMB composites EU a.s.

6. Seznam příloh

1. Příloha 1 – vývoj prototypu – zkoušky prvotních vzorků
 - *Protokol o zkoušce VTÚ/VTÚVM - 2226 - 168/2019*
 - *Protokol o zkoušce VTÚ/VTÚVM - 2591 - 143/2020*

2. Příloha 2 - vývoj prototypu – zkoušky perspektivních vzorků
 - *Protokol o zkoušce VTÚ/VTÚVM-2591- 126/2020*
 - *Protokol o zkoušce VTÚ/VTÚVM -2979-1/2021*
 - *Protokol o zkoušce VTÚ/VTÚVM-2979-48/2021*

3. Příloha 3 – testování prototypu
 - *Protokol o zkoušce VTÚ/VTÚVM-3927-54/2023*