



# STUDIUM MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ HYBRIDNÍCH POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ S DUTÝMI SKLENĚNÝMI KULIČKAMI, UHLÍKOVÝMI A SKLENĚNÝMI VLÁKNY NA BÁZI POLYAMIDOVÉ MATRICE

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2303T002 – Strojírenská technologie  
*Autor práce:* **Bc. Pavel Sehnoutek**  
*Vedoucí práce:* Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# THE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF HYBRID POLYMER COMPOSITES WITH HOLLOW GLASS BUBBLES, GLASS AND CARBON FIBRES BASED ON POLYAMIDE MATRIX

Diploma thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2303T002 – Engineering Technology

*Author:* **Bc. Pavel Sehnoutek**  
*Supervisor:* Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Sehnoutek**  
Osobní číslo: **S12000698**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie**  
Název tématu: **Studium mechanických vlastností hybridních polymerních kompozitů s dutými skleněnými kuličkami, uhlíkovými a skleněnými vlákny na bázi polyamidové matrice**  
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou průmyslového využití polymerních kompozitů. Zpracujte literární rešerši kompozitních struktur s polymerní matricí z hlediska jejich užitných vlastností.
2. Vstříkovaním zhotovte zkušební tělesa kompozitních struktur na bázi polyamidové matrice, dutých skleněných kuliček, skleněných a uhlíkových vláken.
3. V souladu s mezinárodními standardy stanovte pevnostní charakteristiky kompozitních struktur při zatěžování v tahu a ohybu.
4. V souladu s mezinárodními standardy stanovte rázovou houževnatost Charpy a tvrdost Shore D pro připravené kompozitní struktury.
5. Naměřené výsledky diskutujte. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- [1] **JANČÁŘ, Josef.** *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů: klasická a speciální.* 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] **KAW, Autar K.** *Mechanics of composite materials.* 2nd ed. Boca Raton, Fl: Taylor Francis, 2006, 466 p. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fl.), v. 29. ISBN 0-8493-1343-0.
- [3] **EHRENSTEIN, Gottfried W.** *Polymerní kompozitní materiály.* 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-296.
- [4] **MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA.** *Nauka o materiálu.* 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [5] **YALCIN, Baris et al.** *3MTM Glass Bubbles iM16K for Reinforced Thermoplastics.* St. Paul: 3M Center.
- [6] **ARUNIIT, Aare et al.** *Influence of Hollow Glass Microspheres on the Mechanical and Physical Properties and Cost of Particle Reinforced Polymer Composites.* *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2012, Vol. 61, Issue 3, p. 160-165. ISSN 1736-6046.
- [7] **Mezinárodní předpisy ČSN EN ISO**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Habr**  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **2. března 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2016**

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Liberci dne 25. května 2015

.....

Pavel Sehnoutek

# Studium mechanických vlastností hybridních polymerních kompozitů s dutými skleněnými kuličkami, uhlíkovými a skleněnými vlákny na bázi polyamidové matrice

## Anotace

Cílem práce je analýza mechanických vlastností hybridních kompozitních struktur vyztužených dutými skleněnými kuličkami a uhlíkovými nebo skleněnými vlákny. K samotnému experimentu byla použita termoplastická matrice na bázi polyamidu (PA 66). Mechanické vlastnosti byly zjišťovány pomocí zkoušek tahových a ohybových spolu se zkouškami rázové houževnatosti a tvrdosti. Součástí práce je i hodnocení hybridních struktur v porovnání s klasickými kompozitními strukturami, získanými v předchozí výzkumné etapě. Experimentálnímu měření předcházela rešerše teoretických poznatků zabývající se vlastnostmi vyztužujících fází a jejich interakcí v systému kompozitních struktur. Zjištěné teoretické poznatky byly využity k závěrečnému zhodnocení výsledků.

*Klíčová slova:* mechanické vlastnosti, hybridní kompozit, duté skleněné kuličky, uhlíková vlákna, skleněná vlákna, polyamid

## The study of mechanical properties of hybrid polymer composites with hollow glass bubbles, glass and carbon fibres based on polyamide matrix

## Annotation

The aim of diploma thesis is an analysis of mechanical properties of hybrid composite structures reinforced by hollow glass bubbles and carbon or glass fibres. Thermoplastic matrix based on polyamide (PA 66) was used for actual experiment. Mechanical properties were measured using tensile and bending tests together with impact resistance and hardness. The diploma thesis also includes evaluation of hybrid structures compared to traditional composite structures obtained in previous research stage. Experimental measurements were preceded by a research theoretical knowledge into properties of reinforcing phases and their interaction in the system of composite structures. Theoretical findings were used for the final evaluation of the results.

*Key words:* mechanical properties, hybrid composites, hollow glass bubbles, carbon fibres, glass fibres, polyamide

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za ochotu, pomoc při měření, čas strávený konzultacemi a příkladné vedení mé diplomové práce. Také děkuji Ing. Jirímu Habrovi za pomoc v dílnách při vstřikování zkušebních těles a samozřejmě všem členům katedry strojírenské technologie, kteří byli během mého studia vždy ochotni poskytnout radu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, která mi jednak umožnila studium a během celého studia mne podporovala a vyjadřovala trpělivost.

.....

Pavel Sehnoutek

*Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektů Technologické agentury České republiky TA04011009 "Výzkum užitečných vlastností a aplikačních možností lehkých polymerních kompozitů pro stavbu karoserie" a studentské grantové soutěže SGS 21005 „Výzkum vlivu procesních veličin na kvalitu výsledných produktů technologických procesů“.*

# Obsah

---

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	10
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>14</b>
2.1 DEFINICE KOMPOZITU .....	14
2.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	15
2.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	18
2.4 MATRICE .....	18
2.3.3 <i>Polymerní matrice</i> .....	19
2.3.3.1 <i>Reaktoplastové matrice</i> .....	19
2.3.3.2 <i>Termoplastické matrice</i> .....	20
2.5 VÝZTUŽE.....	21
2.4.1 <i>Vlákna a vláknové kompozity</i> .....	21
2.4.1.1 <i>Aramidová vlákna</i> .....	23
2.4.1.2 <i>Uhlíková vlákna</i> .....	24
2.4.1.3 <i>Skleněná vlákna</i> .....	26
2.4.2 <i>Částicové kompozity</i> .....	28
2.4.2.1 <i>Skleněné duté kuličky</i> .....	30
2.4.3 <i>Hybridní kompozity</i> .....	31
2.6 APLIKACE POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ .....	33
2.7 POLYAMIDY .....	34
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>38</b>
3.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	38
3.1.1 <i>Vstřikování zkušebních těles</i> .....	39
3.1.2 <i>Podmínky kondicionace zkušebních těles</i> .....	40
3.2 STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	41
3.3 STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	47
3.4 STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI CHARPY .....	51
3.5 STANOVENÍ TVRDOSTI SHORE D .....	54
<b>4 VYHODNOCENÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>57</b>
4.1 ZHODNOCENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ HYBRIDNÍCH KOMPOZITŮ.....	57
4.1.1 <i>Mez pevnosti v tahu</i> .....	57
4.1.2 <i>Modul pružnosti v tahu</i> .....	63
4.1.3 <i>Poměrné prodloužení při přetržení</i> .....	68
4.2 ZHODNOCENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ HYBRIDNÍCH KOMPOZITŮ..	73



4.2.1	<i>Mez pevnosti v ohybu</i> .....	73
4.2.2	<i>Modul pružnosti v ohybu</i> .....	78
4.3	ZHODNOCENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI HYBRIDNÍCH KOMPOZITŮ..	82
4.4	ZHODNOCENÍ TVRDOSTI HYBRIDNÍCH KOMPOZITŮ.....	87
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>92</b>
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	99
	SEZNAM PŘÍLOH	

## Seznam použitých zkratk a symbolů

---

<i>Zkratka/symbol</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
D	[mm]	průměr vlákna
$E_c$	[J]	energie spotřebovaná při přeražení tělesa
$E_f$	[MPa]	modul pružnosti v ohybu
$E_t$	[MPa]	modul pružnosti v tahu
L	[mm]	délka vlákna
$L_0$	[mm]	počáteční měřená délka
$L_p$	[mm]	délka podpěr
$T_g$	[°C]	teplota zesklnění
$T_m$	[°C]	teplot tání
$V_c$	[cm <sup>3</sup> ]	celkový objem kompozitu
$V_f$	[cm <sup>3</sup> ]	celkový objem disperze
$V_m$	[cm <sup>3</sup> ]	celkový objem matrice
$a_{cU}$	[kJ/m <sup>2</sup> ]	rázová houževnatost Charpy
b	[mm]	šířka zkušebního tělesa
h	[mm]	tloušťka zkušebního tělesa
$m_{vik}$	[g]	hmotnost vzorku v imerzní kapalině
$m_{vv}$	[g]	hmotnost vzorku na vzduchu
v	[mm/min]	rychlost zatěžování
$v_f$	[%]	objemový podíl disperze
$v_m$	[%]	objemový podíl matrice
$\rho_{ik}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	hustota imerzní kapaliny
$\rho_{vZ}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	hustota měřeného vzorku
$\sigma_{fM}$	[MPa]	mez pevnosti v ohybu
$\sigma_{fM1}$	[MPa]	hodnota ohybového napětí při deformaci 0,05 %
$\sigma_{fM2}$	[MPa]	hodnota ohybového napětí při deformaci 0,25 %
$\sigma_m$	[MPa]	mez pevnosti v tahu
$\varepsilon_1$	[%]	poměrné prodloužení v tahu při deformaci 0,05 %
$\varepsilon_2$	[%]	poměrné prodloužení v tahu při deformaci 0,25 %
$\varepsilon_{f1}$	[%]	poměrné prodloužení v ohybu při deformaci 0,05 %
$\varepsilon_{f2}$	[%]	poměrné prodloužení v ohybu při deformaci 0,25 %
$\varepsilon_b$	[%]	poměrné prodloužení při přetržení v tahu

AA	kyselina adipová
ABS	akrylonitril-butadien-styren
AF	aramidová vlákna
Al(OH) <sub>3</sub>	hydroxid hlinitý
CF	uhlíková vlákna
EP	epoxidové pryskyřice
GB	skleněné kuličky
GF	skleněná vlákna
HMD	hexametylendiamin
LGF	dlouhá skleněná vlákna
Mg(OH) <sub>2</sub>	oxid hořečnatý
PA	polyamid
PC	polykarbonát
PE	polyethylén
PET	polyethyléntereftalát
PF	fenolformaldehydové pryskyřice
PP	polypropylen
PS	polystyren
SiO <sub>2</sub>	oxid křemičitý
UP	polyesterové pryskyřice
VE	vinylesterové pryskyřice

# 1 Úvod

---

Je známo, že technologický vývoj je závislý především na pokroku v materiálovém inženýrství a materiály měly vždy nezastupitelné místo ve vývoji lidstva [1, 2]. První kroky lidské civilizace byly pojmenovány právě podle materiálů, doba kamenná, doba bronzová, doba železná a v dnešní době tomu není jinak a materiály hrají rozhodující roli v technologickém vývoji. Při vývoji nové aplikace se inženýr neobejde bez znalosti vlastností materiálu, kterého hodlá využít a právě znalost chování materiálu je rozhodujícím limitním faktorem pro dosažení co nejlepšího výkonu výrobku, stroje či zařízení [2].

Udržitelný světový ekonomický růst a zlepšování úrovně lidského života silně závisí na použití alternativních produktů ve všech odvětvích. Je kladen stále větší důraz na maximální využití dostupných materiálů a zlepšování jejich stávajících vlastností a z tohoto důvodu jsou v dnešní době polymerní materiály využívány v čím dál větším spektru produktů [3, 4]. Ne nadarmo se říká, že dnešní doba patří plastům, které jsou používány ve všech odvětvích, které si dokážeme představit od obalů v potravinářském průmyslu, přes zdravotnické pomůcky (implantáty, přístroje, nástroje) až po užití v konstrukci automobilovém, leteckém, kosmickém nebo vojenském průmyslu [5]. V dnešní době jsou tradiční materiály jako dřevo, kov, hliník, kůže, sklo stále více nahrazovány syntetickými materiály, většinou právě materiály na bázi polymerů. Důvod této změny najdeme ve vlastnostech, které jiné materiály nemají, nízká hmotnost, výborné izolační vlastnosti, dobrá odolnost proti korozi a snadná zpracovatelnost. I přes nesporné výhody polymerních materiálů, bránila jejich většímu konstrukčnímu využití, jejich vlastní strukturní podstata. Uhlíkové řetězce polymerů určují jejich omezené hodnoty pevnosti, tuhosti a časové a teplotní nestability. Právě tyto nevýhody lze z velké části ovlivnit přidáním různých druhů výztuží ve formě vláken nebo částic. Tyto přidané disperzní fáze mají vysokou pevnost, tuhost, jsou teplotně a časově stálé a mají mnoho dalších výhod, podle použité vyztužující fáze. Tímto spojením lze dosáhnout **kompozitu**, nového materiálu, se zcela novými vlastnostmi, které ho předurčují ve využití i v oblastech, ve kterých to bylo dosud nemožné [3, 5].

Polymerní kompozity mají v dnešní době nezastupitelné místo ve všech možných inženýrských, ale i neinženýrských aplikacích. Obrovskou výhodou těchto kompozitů je velká flexibilita v tvorbě materiálových struktur a s tím související jejich široké spektrum užitečných vlastností, jednoduchá výroba s vysokou rozměrovou přesností. Všechny tyto aspekty vedou k nižším energetickým požadavkům a s tím související nižší ekonomickou náročností a menšího dopadu na životní prostředí, což jim dává výhodu nad konkurenční ocelí a hliníkem [5, 6].

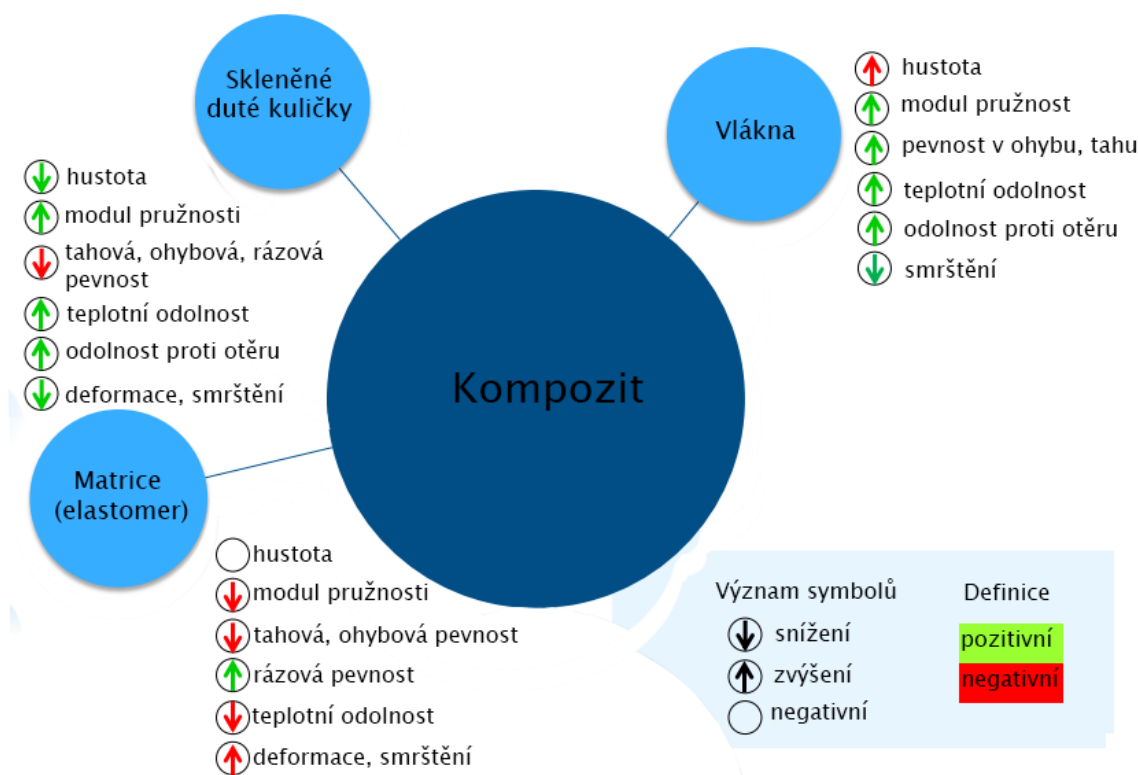
Cílem diplomové práce je stanovení pevnostních charakteristik hybridních kompozitů v tahu a ohybu, jejich rázové houževnatost Charpy a tvrdosti Shore D. Zkušební tělesa na bázi polyamidové matrice, konkrétně polyamid 66, byla zhotovena podle mezinárodních norem technologií vstřikování. Zkoumaná tělesa byla plněna dutými skleněnými kuličkami, skleněnými krátkými a dlouhými vlákny a uhlíkovými vlákny v různých hmotnostních poměrech.

## 2 Teoretická část

Teoretická část diplomové práce je s ohledem na řešenou problematiku zaměřena na charakteristiku a aplikace polymerních kompozitů v průmyslové praxi. V druhé části je pozornost věnována polyamidu, tj. polymeru, který je používán v experimentální části diplomové práce při přípravě a hodnocení vlastností hybridních kompozitních výstřiků.

### 2.1 Definice kompozitu

Kompozitní materiály jsou heterogenními systémy lišící se oproti klasickým homogenním materiálům tím, že jsou složeny minimálně ze dvou částí nebo fází, které se navzájem výrazně liší ve fyzikálních, mechanických, chemických vlastnostech a u nichž je patrné fázové rozhraní [5, 7, 8, 9]. Jednotlivé samostatné komponenty mají své unikátní výhody, a proto může být dosaženo požadovaných vlastností kompozitů, kterých by jinak nebylo dosaženo jednotlivými fázemi samostatně [5]. Jedna fáze má funkci pojiva a nazývá se **matrice**. Druhou sekundární fází je **výztuž** (plnivo). Sekundární fáze není většinou spojitá a je tvořena převážně vlákny nebo částicemi různého tvaru [8].



Obr. 1 Vliv spojitě a nespojitě fáze kompozitu na jeho vybrané vlastnosti [10]

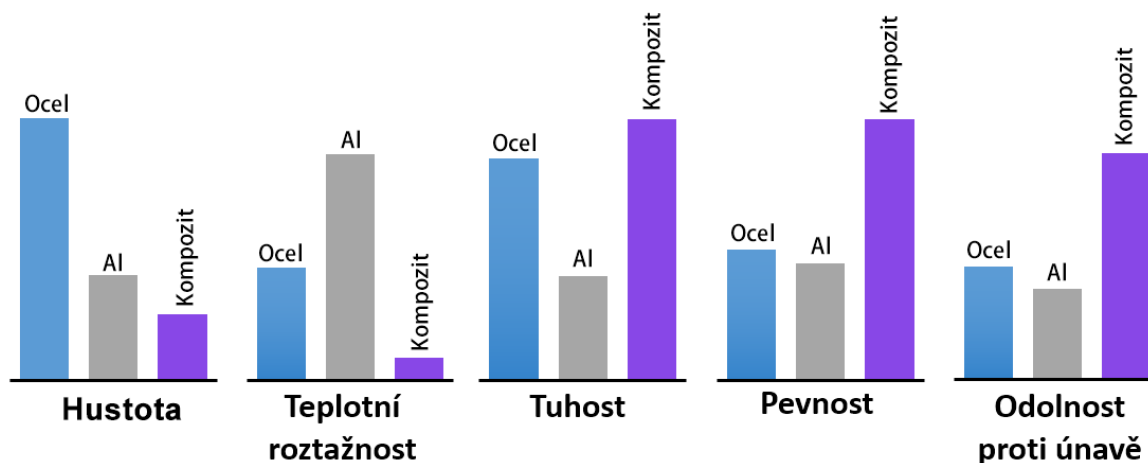
Matrice plní několik funkcí. Hlavní úlohou je zajištění celistvosti kompozitního systému, tj. dokonalé spojení nosné části a vytvoření vnějšího tvaru, který musí zajistit správnou funkci tělesa. Matrice slouží jako ochrana výztuže před okolním prostředím, jak mechanickým (například abrazí), tak chemickým, udržuje výztuž ve vhodné orientaci vůči namáhání a dodává kompozitu fyzikální (elektroizolační, tepelné) a mechanické vlastnosti (tvárné matrice mohou zpomalit a zastavit trhliny). V neposlední řadě zprostředkovává zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken, mezi vlákny u krátkovláknových kompozitů, mezi vlákny nerovnoměrně zatíženými a přemostuje také trhliny ve vláknech. Obecným mechanickým požadavkem na matici je dobrá adheze k výztuži a dobrá mezní tažnost [5, 9, 11, 12]. Vytuzující fáze poskytuje kompozitu hlavně zvýšení mechanických hodnot jako je pevnost a tuhost, v případě částicových plniv snižuje cenu a hustotu kompozitu [11].

Konkrétní případ vlivu jednotlivých složek lze uvést na příkladu vláknového polymerního kompozitu. Polymer, což může být například pryskyřice, má výborné zpracovatelské vlastnosti, nízkou hustotu a dobrou odolnost proti chemikáliím. Důvody omezení samotné pryskyřice v širším spektru užití lze nalézt v jejích velmi nízkých mechanických hodnotách, jako jsou modul pružnosti (max. 6 GPa), pevnost (100 MPa), křehkost nebo nízká kríповá odolnost. Oproti tomu vytuzující vlákna, například v podobě skleněných vláken, mají výborné mechanické vlastnosti (tuhost, pevnost), ale jsou křehká a velmi špatně tvarovatelná do požadovaného prostorového uspořádání. V případě spojení těchto dvou materiálů lze získat kompozitní systém s vlastnostmi, které nedosahuje samostatně žádná z jeho složek. Matrice poskytuje chemickou odolnost, nízkou hustotu a umožní prostorové uspořádání výztuže při výborných zpracovatelských možnostech. Oproti tomu, skleněná vlákna dodají materiálu potřebnou tuhost, pevnost a výborné tepelné a elektrické izolační vlastnosti. Vzájemným působením těchto složek dosáhne materiál synergického efektu a získáme vlastnosti, kterých nelze dosáhnout jednotlivými komponenty samostatně [5]. Na obr. 1 jsou znázorněny další vlivy spojitě a nespojitě fáze kompozitu na výsledné vlastnosti kompozitních materiálů.

## 2.2 Kompozitní materiály

V praxi je možné připravit kompozity, které se svojí pevností a tuhostí vyrovnají ocelím, ale s hustotou o 70 % menší. Jsou také například až třikrát pevnější a mnohem lehčí než hliník, který je běžnou strukturní součástí letadel [13]. Na obr. 2 je pro ilustrativní účely srovnání mezi konvenčními monolitickými materiály (jako je hliník a ocel) a kompozitními materiály. Grafické vyjádření ukazuje jakého zlepšení je možno dosáhnout použitím kompozitních materiálů v porovnání s běžnými materiály [1]. Například vláknové kompozity na bázi polymerní matrice vytužené uhlíkovými vlákny mají značné výhody, mimo jiné, v hmotnosti, pevnosti a tuhosti, pokud zohledníme poměr mechanických hodnot k hustotě [13].

Pevnost kompozitu, ale i ostatních jeho vlastností jsou obecně závislé na poměru matrice a dispergované fáze [14]. Obecně lze říci, že čím větší podíl vyztužující složky, tím se mechanické vlastnosti kompozitů (jako je pevnost a tuhost) zlepšují a to až do podílu výztuže (70 ÷ 80) %. Nad touto hodnotou by matrice už nebyla schopna dokonale směřovat výztuž a nebylo by možné zaručit dostatečnou adhezi výztuže k matrici a s tím přenos vnějších sil [9, 11].



Obr. 2 Porovnání konvenčních materiálů a kompozitů [1]

Základní prvky ovlivňující chování kompozitů jsou [15, 16]:

- vlastnosti vyztužujících vláken,
- vlastnosti matrice,
- vlastnosti mezivrstvy,
- objemový zlomek vláken v matrici,
- geometrie a orientace vláken v matrici.

Vlastnosti kompozitů jsou tedy především ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových složek, jejich rozložením a interakcí mezi nimi, která je výsledkem tzv. synergického efektu. Výsledné vlastnosti kompozitních systémů jsou určovány také podílem jednotlivých složek a geometrických uspořádání výztuže v matrici (tvarem, velikostí a jejich distribucí). Podíl jednotlivých složek v kompozitním systému lze vyjadřovat hmotnostně nebo objemově dle rovnice (1) a (2) [7].

Objemový podíl disperze (vláken, částic) v kompozitů je definovaný jako [17]:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (1)$$

kde je:	$v_f$	objemový podíl disperze	[%]
	$V_f$	celkový objem disperze	[cm <sup>3</sup> ]
	$V_c$	celkový objem kompozitů	[cm <sup>3</sup> ]



Objemový podíl matrice v kompozitu je definovaný jako:

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (2)$$

kde je:	$v_m$	objemový podíl matrice	[%]
	$V_m$	celkový objem matrice	[cm <sup>3</sup> ]
	$V_c$	celkový objem kompozitů	[cm <sup>3</sup> ]

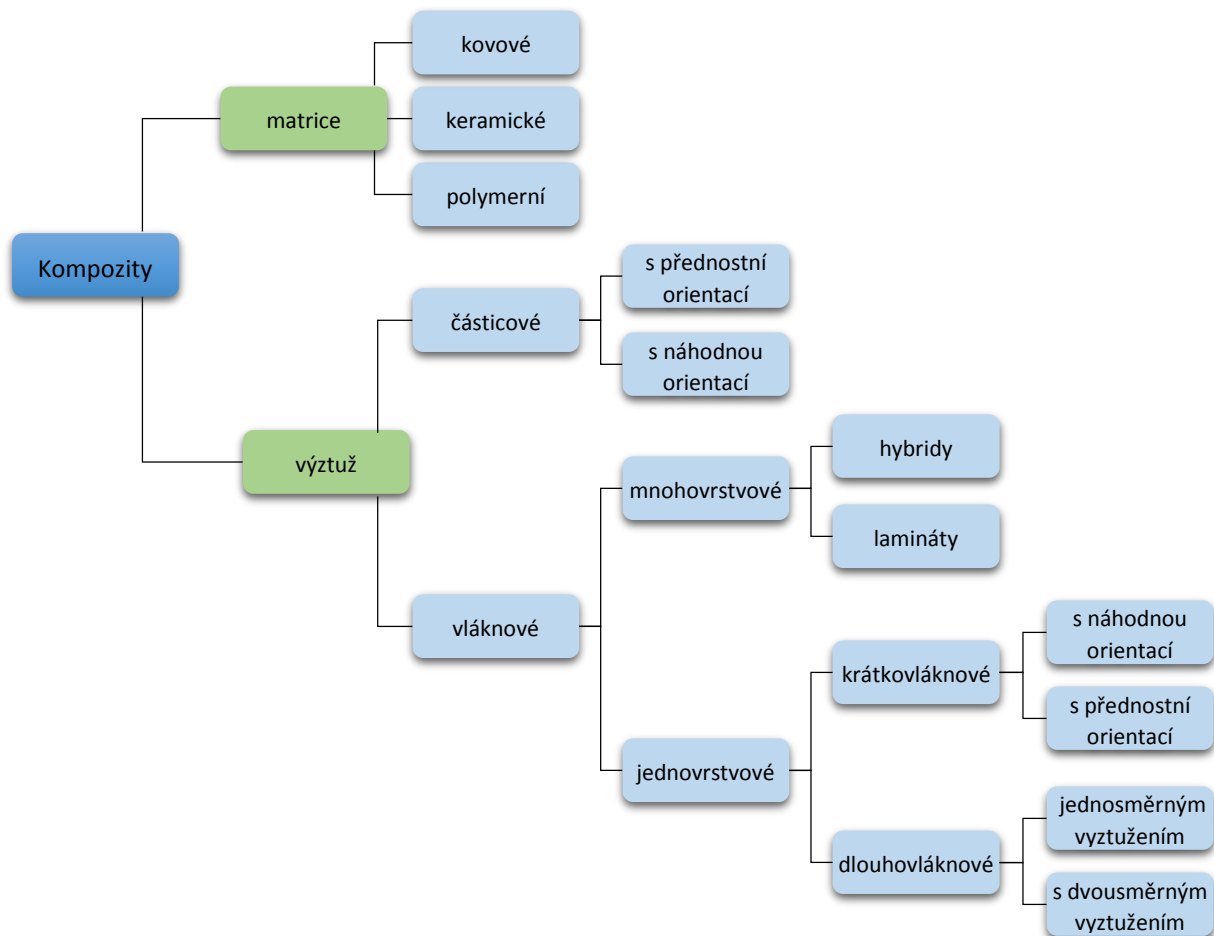
Orientace a tvar výztuže rozhoduje, zda se kompozit bude chovat izotropně nebo anizotropně. Kompozitní materiál se může chovat izotropně ve dvou případech. Má-li disperzní fáze ve všech směrech přibližně stejné rozměry, pak jeho vlastnosti nejsou závislé na směru (normálové zatížení vyvolá pouze normálové napětí). Druhý případ nastane tehdy, je-li kompozit vyztužen krátkými, náhodně rozptýlenými vlákny. Pokud jsou výztuže (převážně dlouhá vlákna) orientovány přednostně, tak se materiál chová anizotropně, což je u jednosměrných dlouhováknových kompozitů požadováno a vlákna jsou orientována účelně kvůli požadovaným vlastnostem kompozitu [7, 9, 11].

Výhod kompozitů je značné množství. Nejcennějšími vlastnostmi je vysoká měrná pevnost (tzn. poměr pevnosti/hustoty) a vysoký měrný modul pružnosti (tzn. poměr modulu pružnosti/hustoty) ve spojení s nízkou hustotou, čehož je docíleno převážně uhlíkovými vlákny, jejichž vlastnosti převyšují ocelové slitiny používané například v kosmickém průmyslu. Dalšími významnými vlastnostmi je zlepšení únavových a rázových vlastností, dobrá odolnost proti otěru, kompozity lze snadno tvarovat na složité tvary, snadno se lepí, mají dobrou schopnost mechanického tlumení (jedná se o antivibrační a antihlukové materiály), schopnost přizpůsobit se složením optimální pevnosti a tuhosti, vhodně zvoleným designem lze docílit snížení ceny dílů v důsledku méně dílčích částí a upevňovacích prvků, mají zvýšenou stabilitu za vyšších teplot a nižší teplotní roztažnost (rozšiřující teplotní interval použitelnosti), mají také zvýšenou elektrickou vodivost (kompozit s uhlíkovými vlákny), sníženou propustnost pro plyny a kapaliny, sníženou nasákavost, zvýšenou rozměrovou stabilitu a recyklovatelnost. V neposlední řadě mají dobrou korozní a chemickou odolnost, která příznivě snižuje například náklady na údržbu kompozitních dílů, což je problém například u slitin hliníku, který je používán v leteckém průmyslu [11, 14, 18, 19, 20].

Nevýhodami kompozitů je vysoká cena výrobních surovin, dlouhá doba vývoje a výrobní problémy (například problematika k životnímu prostředí), nepříznivý vliv teploty a vlhkosti, které mají za následek snižování jejich pevnostních charakteristik a náročná oprava kompozitních materiálů [11, 20].

## 2.3 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály je možné rozdělit podle několika hledisek: podle materiálu matrice, materiálu výztuže, geometrického tvaru výztuže nebo podle použití (viz obr. 3). **Podle typu matrice** mohou být kompozity kovové, keramické nebo polymerní. Také podle materiálu výztuže mohou být kovové, anorganické nebo organické (polymerní) a dle **geometrického tvaru výztuže** se člení na vláknové, částicové nebo hybridní [6, 14, 21].



Obr. 3 Schéma rozdělení kompozitů [7]

## 2.4 Matrice

Matrice pro kompozitní materiály může být na bázi kovů, keramiky nebo na bázi polymerů. Výběr použití matrice je podmíněn požadovanými vlastnostmi, polymerní matrice má malou pevnost a tuhost, kovové matrice mají střední pevnost a tuhost, ale vysokou tvárnost a keramické matrice mají vysokou pevnost i tuhost, ale jsou křehké (viz tab. 1). Při výběru matrice je potřeba zohlednit zamýšlenou aplikaci kompozitu, způsob jeho výroby a systém jako celek. Samozřejmým předpokladem je však dobrá mezifázová adheze a vhodné

deformačně – napěťové vlastnosti. V dalších odstavcích je s ohledem na téma diplomové práce věnována pozornost pouze maticím na bázi polymeru [11, 22].

### 2.3.3 Polymerní matrice

Polymerní matrice mají velmi nízkou hustotu, snadno se zpracovávají, ale jsou teplotně nestabilní a mají nízké mechanické vlastnosti [12, 15, 23]. Protože pro výrobu kovových a keramických matic je potřeba vyšších teplot a občas také větších tlaků, jsou polymerní matrice levnější [11]. Matici může tvořit termoplast, reaktoplast nebo zesíťovaný elastomer (styren - butadien, akrylonitril-butadien) [12, 15, 23].

**Tab. 1** Vlastnosti matic kompozitního systému [15]

Matrice	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Pevnost v tahu (MPa)	Hustota (g/m <sup>3</sup> )
Reaktoplasty			
Epoxidová pryskyřice	3 – 6	35 – 100	1,1 – 1,4
Polyester	2 – 4,5	40 – 90	1,2 – 1,5
Termoplasty			
Polyamid 6.6	1,4 – 2,8	60 – 70	1,14
Polypropylen	1 – 1,4	20 – 40	0,9
PEEK	3,6	170	1,26 – 1,32
Kovy			
Hliník	70	200 – 600	2,7
Hořčík	45	100 – 300	1,8
Titan	110	300 – 1000	4,5
Keramika			
Borosilikátové sklo	64	100	2,3
Karbid křemíku	400	400	3,4
Oxid hlinitý	380	500	3,8

#### 2.3.3.1 Reaktoplastové matrice

Reaktoplasty jsou většinou dodávány ve formě viskózní kapaliny podobné řídkému medu. Při jejich zpracování je nutné, aby došlo k jejich vytvrzení, kterého dosáhneme přidáním katalyzátoru a dodáním energie ve formě tepla nebo světla. Při procesu vytvrzování dochází ke vzniku tuhé prostorové polymerní sítě, která má za následek, že reaktoplasty zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jejich odolnost křípu a vyšším teplotám. Nevýhoda je jejich obtížná recyklovatelnost, právě kvůli jejich zesíťované struktuře [5]. Reaktoplasty mají při teplotě 20 °C pevnost v tahu (20 ÷ 80) MPa a modul pružnosti 2 ÷ 5,2 GPa [5, 24, 25].

Reaktoplastové matrice mají obecně nízkou pevnost, modul pružnosti, značnou křehkost, náchylnost ke krípu a většinou nízkou hustotu, aby výsledná matrice byla schopna dostatečně prosytit a smáčet disperzní fázi. Tento typ matrice převládá u konstrukčních aplikací vláknových kompozitů [24].

Mezi nejpoužívanější reaktoplastické matrice patří [5]:

- *nenasycené polyesterové pryskyřice,*
- *vinylesterové pryskyřice,*
- *epoxidové pryskyřice,*
- *fenolické pryskyřice.*

Každá pryskyřice má trochu jiné vlastnosti a účel použití. Například nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP) jsou nejlevnějším druhem reaktoplastu a její doba vytvrzování je krátká, což jí předurčuje k využití v hromadné výrobě. Vinylesterové pryskyřice (VE) jsou chemicky a tepelně odolnější. Ještě větší tepelnou a chemickou odolnost mají epoxidové pryskyřice (EP), které zároveň vykazují relativně dobré mechanické vlastnosti. Kvůli malému vývinu toxických zplodin a kouře jsou laminační fenolformaldehydové pryskyřice (PF) využívány při konstrukci letadel nebo metra. Pryskyřice na bázi imidových polymerů mají největší tepelnou odolnost ze všech reaktoplastů [26].

### **2.3.3.2 Termoplastické matrice**

Termoplastických matrice získávají čím dál více na významu v hromadné výrobě kompozitů. Oproti pryskyřicím se nemusejí vytvrzovat a pro zpracování se zahřívají nad teplotu tání kompozitu. Ochlazením pod teplotu přejdou do pevného a tuhého stavu [5, 26].

Termoplastické matrice jsou většinou houževnatější než reaktoplastické a mají lepší mechanické vlastnosti. Mez pevnosti při teplotě 20°C se pohybuje u termoplastů i nad 100 MPa a modul pružnosti okolo 4 GPa [25].

Mezi nejpoužívanější termoplastické matrice lze zařadit [5]:

- polypropylen (PP),
- polyetylén (PE),
- polystyren (PS),
- polykarbonát (PC),
- polyetylén tereftalát (PET),
- polyamid (PA) a další.

## 2.5 Výztuže

Druhou základní složkou kompozitu je vyztužující fáze. Rozsah disperzních fází je velmi rozmanitý a pro vyztužení matrice je na trhu nepřeberné množství výztuží, od minerálních a syntetických částicových plniv, která nemají určenou orientaci, v dnešní době vedle značně rozšířených přírodních vláken (konopných, kokosových, banánových nebo bavlněných), jejichž základem je celulóza, až po dražší vláknová plniva, jako jsou kovová a slitinová vlákna, whiskery z keramických a metalických materiálů, polymerní, minerální, uhlíková nebo skleněná vlákna. V principu existuje neomezené množství možných kombinací matrice a plniva, kterými lze docílit kompozitního materiálu [6, 11, 18, 27].

### 2.4.1 Vlákna a vláknové kompozity

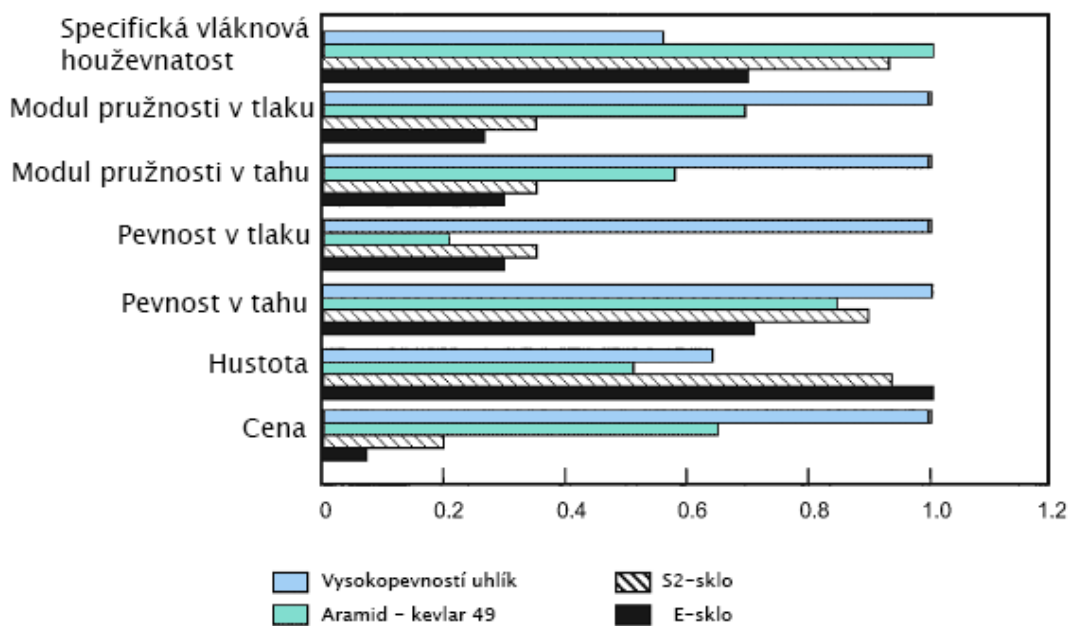
Všechny materiály obsahují více či méně defektů různých druhů, které během výrobního procesu nelze odstranit, ať už to jsou povrchové vady nebo vady strukturální. Vzhledem k malým rozměrům vláken, převážně malým průměrům, je možno snížit procento vad na minimum a zvýšit tak jejich mechanické hodnoty v porovnání s materiály vyráběné objemově [12]. Proto například pevnost uhlíkových vláken roste s klesajícím průměrem vláken, ale zároveň se zvyšuje jejich cena [1, 11]. Například whiskery (monokrystaly) s extrémní pevností, vyráběné z karbidu křemíku, hliníku a boru, nitridů hliníku a křemíku, oxidu hliníku, křemíku a titaničitanu draselného jsou drahá a krátká vlákna ( $10^{-3}$  mm při průměru  $0,1 \div 10$   $\mu\text{m}$ ) obsahující velmi málo vad a jejich pevnost v tahu je větší než u ostatních druhů vláken ( $20 \div 30$  GPa), ale je obtížné je jednotlivě rozptýlit v matrici [8, 11].

Rozměry vláken se výrazně liší. Délka vlákna je mnohonásobně větší než jeho průměr [15, 23]. Tento poměr délky a průměru ( $L/D$ ) je znám jako poměr délek. Dlouhá vlákna mají velký poměr délek, krátká vlákna mají menší poměr délek. Dlouhá vlákna mají v kompozitním systému většinou danou orientaci, krátká vlákna mají ve většině případu orientaci náhodnou [11]. Pro rozdělení vláken, která se přidávají jako výztuha do matrice, lze užít celé řady kritérií. Jedním z nejužívanějších je kritérium délky a orientace vláken [5, 7].

Výsledný kompozitní systém lze tak charakterizovat jako:

- dlouhovláknový –  $L/D > 100$  (kontinuální vlákna)
  - s jednosměrným vyztužením,
  - s dvousměrným vyztužením,
- krátkovláknový – poměr  $L/D < 100$ 
  - s náhodnou orientací,
  - s přednostní orientací.

Nejvyšší pevnosti a modulu pružnosti je dosaženo přidáním dlouhých (kontinuálních) vláken [11]. Dlouhovláknové výztuže jsou srovnatelně dlouhé s délkou výrobku, mohou mít délku desítek až stovek mm. Kontinuální vlákna mohou být zabudována v matici jednosměrně nebo dvousměrně, popřípadě s trojsměrnou orientací. Krátká vlákna jsou menší než délka výrobku a mohou nabývat délky řádově stonásobku průměru vlákna a v matici jsou dispergovaná buď náhodně, nebo s přednostní orientací [15, 23].



**Obr. 4** Porovnání vlastností u vybraných vyztužujících vláken [28]

Lomová houževnatost je u vláknových kompozitních materiálů mnohonásobně vyšší než u nevyztužených polymerů, přestože lomová houževnatost samotných vyztužujících vláken a matrice je malá. Příčinou vysoké lomové houževnatosti je energie spotřebovaná ke vzájemnému oddělení fází, tzn. oddělení vláken od pojiva, kdy dochází ke vzájemnému tření a deformování fází. Další energie se spotřebuje na vytažení uvolněných a již porušených konců vláken z matrice. Hodnoty těchto jednotlivých energií závisí na druhu použitých vláken, na druhu matrice, na objemovém podílu vláken, jejich rozvrstvení a délce [8].

Výsledné mechanické vlastnosti jako podélná tuhost a pevnost jsou ovlivněny mnohými faktory, které mohou mít negativní vliv na výsledné chování vláknových kompozitních materiálů [29]:

- 1) směrová dezorientace vláken v podélném směru,
- 2) vlákna jsou různých délek,
- 3) vlákna ve svazku mají rozdílné pevnosti z důvodu různých průměrů,
- 4) rozdílná kvalita mezifázového rozhraní z důvodu např. nedokonalé impregnace vláken,

- 5) koncentrace napětí na koncích vláken (vnější zatížení je přenášeno na vlákna prostřednictvím matrice),
- 6) přítomnost zbytkových napětí v důsledku různých součinitelů teplotní roztažnosti vláken a matrice. Tato napětí vznikají jednak v procesu výroby kompozitu jednak za provozu při teplotních změnách. Tato zbytková napětí se při provozu superponují s napětími od vnějšího zatížení.

Při výrobě polymerních kompozitů a jejich následném využití mají v praktických aplikacích ve strojírenství význam tři druhy vláken: aramidová, skleněná a uhlíková, jejichž vlastnosti jsou vzájemně porovnány na obr. 4 [23].

#### 2.4.1.1 **Aramidová vlákna**

Aramidové vlákno patří svou chemickou strukturou mezi aromatické polyamidy (viz obr. 6). Největší praktický význam má para-aramid, ve kterém jsou benzenová jádra vázána v para - poloze na amidové skupiny [23]. Pravděpodobně neznámější teplotně odolná aramidová vlákna, byla komerčně vyvinuta firmou DuPont, pod obchodním označením Kevlar (viz obr. 5), kterých je několik druhů, lišící se vlastnostmi a chemickou strukturou (viz tab. 2) [23, 26, 30].

Kevlarová vlákna jsou známa především kvůli svým výborným mechanickým vlastnostem [31]. Jsou odolná proti abrazi a oproti jiným druhům vláken se při zpracování neporušují, mají vysoký měrný modul pružnosti a měrnou pevnost [23, 31]. Vysoké tuhosti a pevnosti je dosaženo dokonalou orientací tuhých lineárních molekul v podélném směru. V kolmém směru na osu vlákna působí menší makromolekulární síly, pouze vodíkové můstky, a proto jsou jejich vlastnosti v tomto směru srovnatelné s polymerní matricí



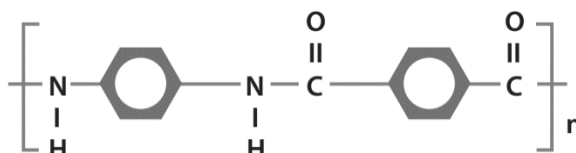
**Obr. 5** Aramidová vlákna [32]

[26]. Svojí pevností a tuhostí je lze řadit mezi uhlíková a skleněná vlákna [11]. Pevnost v tahu kevlarového vlákna (3,4 GPa) je větší než E-skla (2,4 GPa) a modul pružnosti je přibližně dvakrát větší než u E - skla (69 GPa). V porovnání s uhlíkovými vlákny je specifický modul pružnosti kevlarových vláken nižší. Pokud dojde na porovnání s ocelí, tak měrná pevnost v tahu je větší než u oceli (2 GPa) a mnohem větší je i měrný modul pružnosti [33]. Díky jejich extrémní houževnatosti jsou aramidová vlákna schopna absorbovat obrovské množství energie než dojde k jejich prasknutí, což je dáno jejich vysokou hodnotou meze přetržení a schopností snášet plastickou deformaci pod tlakem [11]. Co se týče fyzikálních a chemických vlastností, tak mají vysokou teplotní odolnost a jsou chemicky inertní.



V porovnání s uhlíkovými vlákny mají nízkou elektrickou vodivost a nižší hustotu než je hustota skleněných nebo uhlíkových vláken [23, 31].

Díky schopnosti absorbovat velké množství energie je tkanina z kevlarového vlákna využívána často v aplikacích pro balistickou ochranu jako jsou neprůstřelné vesty, pancíře lehkých bojových vozidel a letadel nebo jako pletenina pro ochranné rukavice [11, 25]. Jsou odolná proti rozpouštědlům, kapalným palivům a solím. I přes přítomnost polárních vodíkových můstků ve struktuře, mající za následek absorpci vody, nedochází však ke zhoršení mechanických vlastností [23].



**Obr. 6** Chemická struktura aramidového vlákna [34]

K velkým nevýhodám patří špatná mezifázová adheze k matici, vyvolaná chemickou inertností a nízkou povrchovou energií kevlarových vláken, což má za následek poměrně nízkou hodnotu příčného tahu a podélného stlačení [11, 31]. Pro zvýšení adheze kevlarových vláken k matici se proto často povrchově upravují (fluorací nebo oxyfluorací) [31].

**Tab. 2** Mechanické vlastnosti některých aramidových vláken [14, 29]

Vlákno	Pevnost v tahu [GPa]	Modul E [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
Kevlar 29	2,9	80	4,0	1,44
Kevlar 49	3,0	130	2,5	1,44
Kevlar 149	3,4	146	2	1,47
Twaron 900	2,8	65	4,3	1,44
Twaron 930	3,0	125	2	1,45
Nomex	0,7	17,3	22,6	1,40

#### 2.4.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (viz obr. 7) poskytují nejširší spektrum mechanických vlastností polymerních kompozitů. Vysoké mechanické hodnoty jsou závislé na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst vzniklých při výrobě, a to při velmi malé hustotě vláken, proto jsou uhlíková vlákna jedny z nejvíce používaných vláken v kompozitních strukturách [11, 23]. Podle toho kolik procent grafitu obsahují, mohou být vlákna uhlíková (převaha amorfního uhlíku) nebo vlákna grafitová (převaha krystalického grafitu) [18]. Grafitová vlákna jsou podrobena



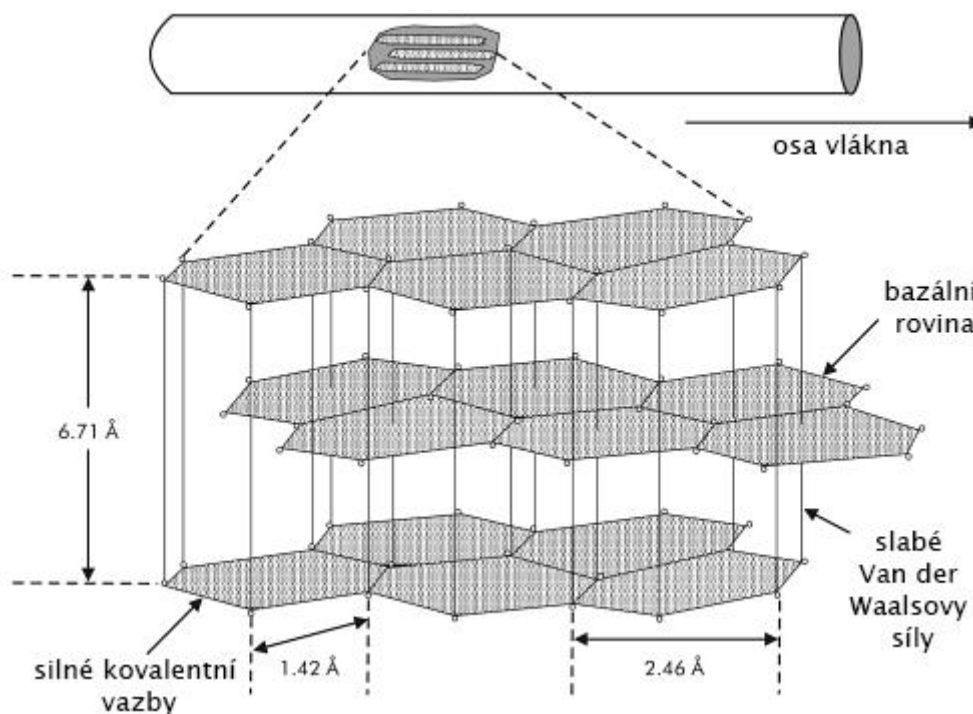
tepelné úpravě nad 2500 °C, mají třídímní uspořádání atomů, obsah uhlíku je větší než 99 % a modul pružnosti větší než 345 GPa. Oproti tomu karbonová (uhlíková) vlákna mají obsah uhlíku nižší, okolo 94 % a jsou podrobeny tepelné úpravě za nižších teplot [11].

Uhlíková neboli karbonová vlákna vykazují vysokou pevnost v tahu ( $2 \div 7$  GPa) i v tlaku, mají vyšší modul pružnosti ( $230 \div 620$  GPa), excelentní únavové vlastnosti a nepodléhají korozi [11, 14]. Uhlíková vlákna mají oproti aramidovým vláknům vyšší hustotu ( $1,6 \div 2,0$  g/cm<sup>3</sup>) a menší hodnotu teploty tání. V porovnání s keramickými nebo skleněnými vlákny je hustota uhlíkových vláken nižší, při dosažení vyšších mechanických hodnot [36]. Jsou velmi odolná proti únavě, přibližně 10x tužší než skleněná vlákna, avšak mnohem dražší a křehčí, a kvůli zpracování se vyrábějí v menších průměrech [18, 23, 26].

Hlavními mechanickými nevýhodami uhlíkových vláken je jejich nízká tažnost (max. 2 %), která je nižší než u skleněných nebo kevlarových vláken [14, 36]. Uhlíková vlákna mají špatnou přilnavost, a proto je potřeba povrchových úprav [18].



Obr. 7 Uhlíková vlákna [35]



Obr. 8 Trojrozměrná struktura uhlíkového vlákna [20][20]

V porovnání se skleněnými vlákny se uhlíková vlákna vyznačují vysokou anizotropií fyzikálních i mechanických vlastností [23, 26]. Vynikající mechanické vlastnosti uhlíkových vláken vyplývají z vysoce anizotropní hexagonální struktury, kterou se vyznačuje grafit,

alotropní modifikace uhlíku (viz obr. 8). V bazálních hexagonálních rovinách grafitu jsou uhlíkové atomy mezi sebou vázány silnými kovalentními vazbami (cca 525 kJ/mol), zatímco mezi těmito rovinami působí slabé Van der Waalsovy síly (cca 10 kJ/mol). Vlastnosti uhlíkových vláken jsou závislé na míře orientace hexagonálních rovin do směru osy vlákna a míře uspořádání hexagonálních rovin mezi sebou. Struktura a vlastnosti uhlíkových vláken jsou tedy dány technologií jejich výroby [11, 23]. To je důvod proč příčná pevnost a modul pružnosti vláken je mnohem menší než ve směru podélném [11]. Poměr vlastností ve směru vlákna a ve směru kolmém na osu vlákna může dosáhnout až 100 násobného rozdílu. Např. je-li modul pružnosti ve směru vlákna 500 GPa, pak kolmo na vlákna je to pouze 6 GPa [18, 23]. Anizotropie má také vliv na fyzikální vlastnosti jako je např. koeficient teplotní roztažnosti. Ve směru osy vlákna je záporný, zatímco ve směru kolmém je kladný a má vysokou hodnotu [23, 26].

Kromě kompozitů s polymerní matricí se uhlíková vlákna používají i pro kompozity s kovovou, keramickou a uhlíkovou matricí. Uhlíkových vláken se v současné době vyrábí velké množství, obvykle se dělí na nízkomodulová, středněmodulová a vysokomodulová, hranice ovšem nejsou standardizovány normou (viz tab. 3) [23].

Uhlíková vlákna mají díky svým vlastnostem obrovské možnosti uplatnění. V aplikacích kde je potřeba vysoké pevnosti, tuhost a nízká hmotnost. Používají se například pro výrobu lopatek rotorů vrtulníků, rámů a šasí závodních automobilů, pro vesmírné rakety, řízené střely apod. Používají se také v aplikacích, vyžadující určité teplotní vlastnosti, např. teplotní štíty střel a raket, brzdy, antény leteckého průmyslu, vesmírné teleskopy a mnoho dalších aplikací [20].

**Tab. 3** Mechanické vlastnosti vybraných uhlíkových vláken [14][14]

Vlákno	Pevnost v tahu [GPa]	Modul E [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
Vysokopevnostní	3,5	230	1,5	1,8
Středně modulová	5,5	290	1,9	1,8
Vysoce modulová	2,2	370	0,7	1,9
Ultra modulová	3,4	520 - 620	0,8	2,0 – 2,1

### 2.4.1.3 Skleněná vlákna

Hromadná výroba skleněných výztuží byla způsobena použitím vyztužených kompozitů v různých konstrukčních aplikacích a i přes značně využívaná aramidová a uhlíková vlákna zůstávají skleněná vlákna (viz obr. 9) nejpoužívanější dispergovanou fází v polymerních kompozitech. Důvod je především v jejich velmi nízké ceně oproti uhlíku a kevlaru. Co se týče mechanických vlastností, tak navzdory mnohem nižší ceně oproti ostatním vláknům nijak nezaostávají, vyznačují se vysokou pevností, rázovou houževnatostí, výbornou chemickou

odolností a oproti uhlíkovým vláknům jsou izotropní, což znamená, že mají vlastnosti v podélném směru stejné jako v příčném [11, 14, 26]. Pokud by se skleněná vlákna porovnali s uhlíkovými vlákny, tak mají nižší modul pružnosti, nižší únavové vlastnosti a nižší odolnost za vyšších teplot, kde i přes amorfni strukturu může dojít k jejich krystalizaci [11, 22].



**Obr. 9** Skleněná vlákna [37][37]

Kromě teploty je pevnost závislá i na stavu povrchu. Při manipulaci s vlákny dochází při jejich vzájemném kontaktu k abrazi a současně dochází k absorpci vzdušné vlhkosti, což může pevnost vlákna snížit až na polovinu. Kvůli ochraně proti důsledkům abraze a vlhkosti se vlákna při jejich výrobě po vytažení z platinové trysky a ochlazení na teplotu okolí pokrývají ochranným povlakem, který také brání vlákna před oxidací a rovněž zvyšuje adhezi a smáčivost polymerními matricemi. Pro kompozitní díly se vlákna opatřují vazebnými prostředky pro zlepšení adheze polymeru k vláknům [25, 26].

**Tab. 4** Typické vlastnosti skleněných vláken [5, 6, 14, 18]

Vlastnosti	Jednotky	Typ skleněných vláken						
		E	A	C	D	L	M	S
Hustota	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,54	2,48	2,49	2,16	4,3	2,89	2,48
Modul pružnosti	[GPa]	73,5	74	71	54	51,1	112	88
Pevnost v tahu	[GPa]	3,5	3,1	3,2	2,5	1,68	3,5	4,9
Poměrné prodloužení do meze pevnosti	[%]	4,8	3,6	3,5	4,7	-	-	5,2
Součinitel tepelné roztažnosti (podélné)	[10 <sup>-6</sup> /K]	4,9	8,55	7,2	3,1	-	5	2,9
Měrná tepelná vodivost	[W/m.K]	0,96	-	-	-	-	-	
Relativní dielektrická konstanta	[-]	6,3	6,9	6,2	3,6	9,5	-	5

Hodnoty mechanických, fyzikálních a chemických vlastností jsou závislé na mnoha faktorech - způsobu výroby vláken, povrchových chybách, absorbované vodě, teplotě, chemických úpravách, průměru vláken atd. Většina skleněných vláken je založena na oxidu křemičitém (SiO<sub>2</sub>) s příměsí oxidů boritého, vápenatého, hlinitého, hořečnatého. Podle vlastností a typu skla se na trhu se skleněnými vlákny můžeme setkat s několika druhy vláken. Od nejběžnějšího typu skleněného vlákna tzv. E-skla až po nejdražší a nejpevnější S-skla [6, 22].

**A-skla (alkalická):** první variantou pro produkci skleněných vláken byly A-skla, s nimiž se lze setkat při výrobě lahví nebo okenních výplní. Jsou velmi levné, ale málo odolné proti zásadám.

**E-skla (elektrická):** v dnešní době jsou nejvíce používána. Vyznačují se vysokým elektrickým odporem a prostupností elektromagnetickým signálem. Tvoří přibližně 90 %

veškeré produkce skleněných vláken. Poskytují dobrou kombinaci pevnosti v tahu (3,5 GPa) a modulu pružnosti (70 GPa).

**C-skla (chemická):** vykazují vysokou odolnost proti kyselinám. Využívána jsou v chemickém průmyslu.

**D-skla (dielektrická):** mají velmi nízkou dielektrickou konstantu, proto je jejich využití zejména v elektrotechnice, elektronice a energetice. Mechanické vlastnosti mají horší než E - skla.

**L-skla (nízkoztrátová) :** obsahují vysoký podíl olova a vyznačují se tak zvýšenou nepropustností proti rentgenovému záření. Využívají se v lékařství nebo vojenském průmyslu.

**M-skla (modulová):** jedná se o vysoko modulová skleněná vlákna, která vykazují vysokou mechanickou tuhost oproti E-sklu, avšak jsou toxická.

**S-skla (pevnostní):** vyznačují se vyšší pevností v tahu, vyšším modulem pružnosti a rázovou houževnatostí než E-sklo. Mají také vyšší teplotní odolnost. Byly vyvinuty především pro leteckou a raketovou techniku. Tyto vlákna mají nejvyšší pevnost v tahu ze všech běžně vyráběných skleněných vláken, dokonce vyšší než karbonová nebo aramidová vlákna. Jejich výrobní cena je oproti konvenčnímu E-sklu velmi vysoká [5, 6, 11, 14].

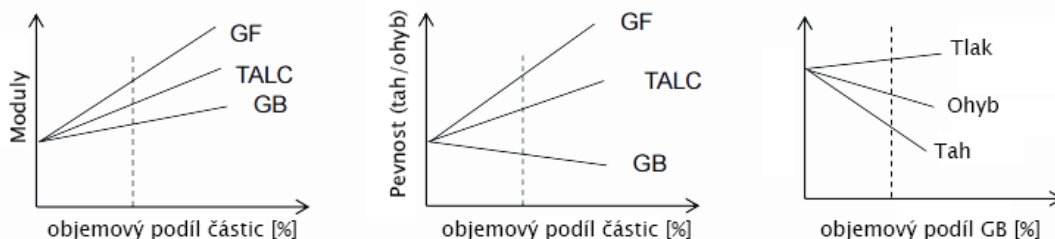
## 2.4.2 Částicové kompozity

Kromě nejvíce využívaných vláknových výztuží, mohou kompozity obsahovat také částice, což jsou nevláknenné útvary s krátkými rozměry s výjimkou destiček, které jsou dispergovány v matrici, omezující rozvoj plastických deformací kompozitů [7, 8]. Kompozity vyztužené částicovou disperzí bývají většinou slabší a méně houževnaté (viz obr. 10), ale jejich cena oproti vláknovým kompozitům je menší [11]. Částicová plniva mohou nabývat různých tvarů – sférických, destičkovitých, nepravidelných a jehlicovitých (viz obr. 11) [8, 15, 23]. Protože částice mají přibližně rozměry ve všech směrech stejné, tak kompozit s touto disperzí fází jsou víceméně izotropní [15, 23].

Mezi částicová plniva patří například uhličitán vápenatý, který může být získáván z křídý, vápence nebo mramoru, dolomit, jílu, talek, síran vápenatý, krystaly silik, saze, (používaná zejména v gumárenském průmyslu), slída, skleněné kuličky, oxidy hliníku, křemíku a hořčíku nebo mikroskopické částičky kovů. Použitím těchto plniv lze získat unikátní fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti polymerních kompozitů, mezi něž patří [8, 38]:

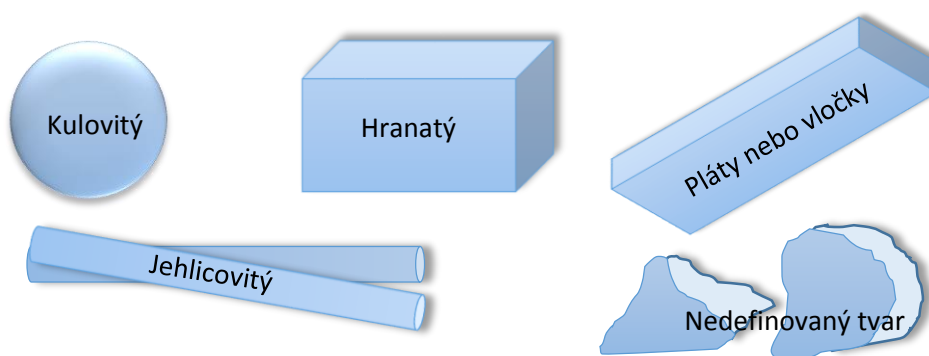
- nižší teplotní roztažnost a teplotní vodivost (lepší přenos tepla, rychlost chlazení a snížení výrobního cyklu),
- výhodnější elektrické vlastnosti (antistatika) a magnetické vlastnosti,
- zvýšení odolnosti vůči hoření,
- zlepšení mechanických vlastností jako je tvrdost a tuhost,

- zvýšení odolnosti proti abrazi,
- nižší cena materiálu,
- kontrola hustoty,
- optické efekty, apod.



**Obr. 10** Vliv částicových plniv na mechanické hodnoty [10]

Jak už bylo řečeno, tak důvody ve využívání části jako plniva v polymerních kompozitech je jejich příznivý vliv na chemické, fyzikální a mechanické hodnoty, jako například modul pružnosti v tahu, nebo pevnost v tlaku (viz obr. 10). Kovové částice bronzu s částicemi grafitu, sulfidu nebo polytetrafluoretylenu se používají pro zlepšení kluzných a ořezávacích vlastností. Při velkém objemu částic v matrici se snižuje hořlavost, a například při použití části  $Mg(OH)_2$  nebo  $Al(OH)_3$  v polyolefinové matrici jsou kompozity samozhášivé, protože při chemické reakci dochází k uvolňování vody [7, 26]. Krystaly silika zvyšují odolnost proti abrazi. Většina částicových plniv má menší koeficient teplotní roztažnosti než polymery a proto mohou snižovat tento koeficient u kompozitních materiálů [38].



**Obr. 11** Idealizované tvary typických částicových plniv [38][38]

Částicová plniva obsahují i určité prvky, které mohou ovlivnit vlastnosti nepříznivě. Přidáním křemíku, který je běžnou součástí minerálních plniv, lze zvýšit abrazivnost. Rozpuštěné soli jsou schopné ovlivnit absorpci vody. Snížení tepelné a světelné stability polymerní matrice mohou způsobit stopové množství prvků jako měď, nikl. Částicová plniva není vhodné používat například ke zvýšení lomové odolnosti, s výjimkou kaučukovitých částic, protože z důvodu malých rozměrů nejsou částice schopny brzdit trhliny rostoucí kolmo na



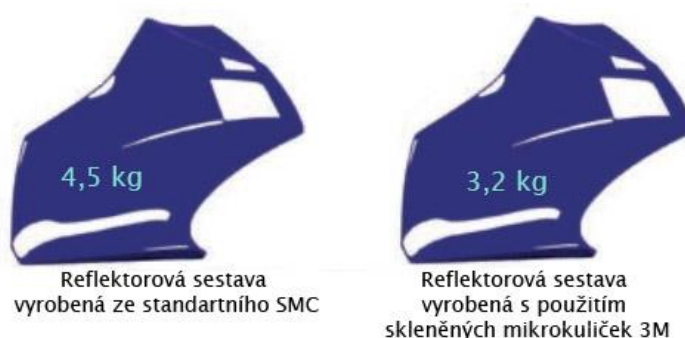
vyztužení [7, 38]. V případě větších rozdílů v poměru stran se zvyšuje anizotropie materiálu, což vede k problémům s deformací [38].

Vzhledem k tématu diplomové práce je v následujících odstavcích věnována pozornost částicovému plnivu na bázi dutých skleněných kuliček.

### 2.4.2.1 Skleněné duté kuličky

Přidáváním částicových plniv do kompozitních dílů dochází k zvyšování jejich hustoty, což může být nežádoucí především v případech, kdy je hlavním cílem snížení hmotnosti dílu a snížení celkových nákladů na výrobu, i přes mírný pokles některých mechanických hodnot, je možno použít částicovou disperzní fázi ve formě dutých skleněných kuliček [18].

Skleněné duté kuličky disponují určitými vlastnostmi, kterých jiná částicová plniva nedosahují a je možno jimi dosáhnout vylepšení vlastností výsledného produktu a zlepšení zpracovatelských vlastností [39, 40]. Jejich kulatý tvar umožňuje snížení spotřeby pojiva v kompozitu (viz obr. 12), snižuje



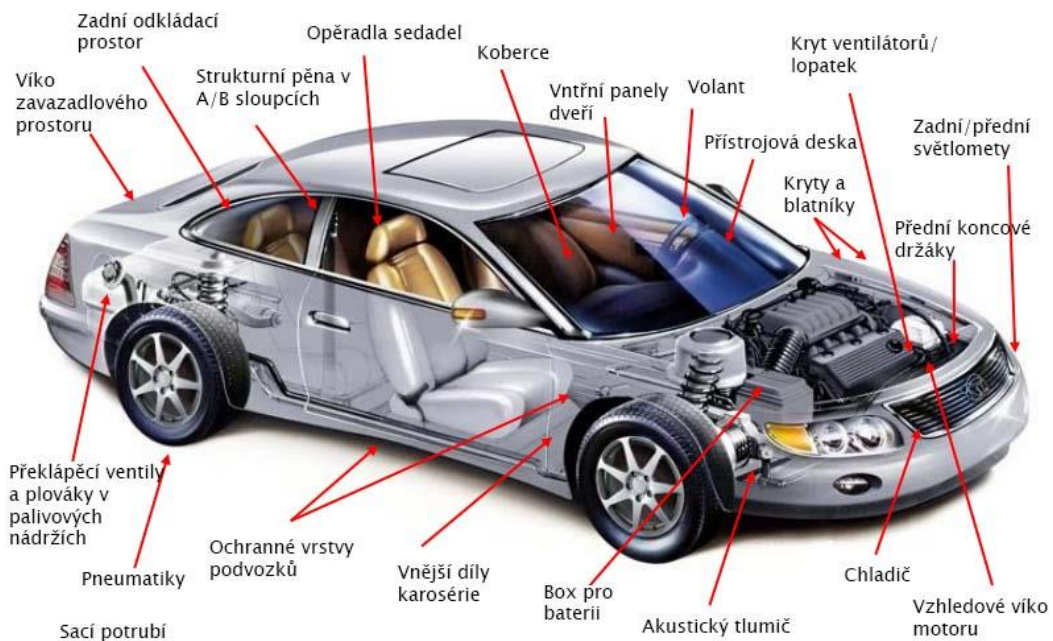
Obr. 12 Porovnání hmotnosti kompozitu s a bez použití dutých skleněných kuliček [39]

výrobní cykly nebo snižuje množství odpadu [39]. Největší výhodou je jejich schopnost snížit hustotu materiálu a tím i hmotnost dílu. Oproti jiným plnivům, založených na minerálech jako talek, silika, sádra, slída, mají mnohem menší hustotu. Například skleněné kuličky „Q-cell“ od firmy Potters mají hustotu od  $(0,14 \div 0,20) \text{ g/cm}^3$ , což je přibližně 1/5 hustoty většiny používaných reaktoplastových pryskyřic [40]. Nižší hmotnost může snížit náklady na dopravu, může umožnit výrobu větších produktů a lze s dílem snadněji manipulovat [41]. Dalšími důvody pro jejich užití jsou snížená deformace a zlepšená rozměrová stabilita dílu, hladší povrch dílu, lepší tepelná izolace, jednodušší obrobiteľnosť dílu a menší smršťování. Použití skleněných kuliček vytváří tzv. efekt kuličkového ložiska, čímž zvyšuje tekutost a zlepšuje tak zpracovatelské vlastnosti kompozitního systému [39, 40, 41].

Využití skleněných kuliček najdeme ve všech průmyslových odvětvích. Rapidní rozmach hlubokomořského průzkumu v polovině 20. století byl jedním z hlavních důvodů velkého rozmachu skleněných dutých kuliček. Pro výrobu hlubokomořských zařízení bylo zapotřebí nových materiálů, velice lehkých, odolných proti vodě a odolných proti vysokému tlaku, který panuje ve vysokých hloubkách [42].

V dnešní době nacházejí skleněné kuličky velkou oblibu v automobilovém průmyslu (viz obr. 13). Kompozity se sklenými kuličkami mohou nahradit kovové komponenty pohonného systému, interiéru i karosérií jako jsou dveře, nárazník, protihlukové kryty a stínítka

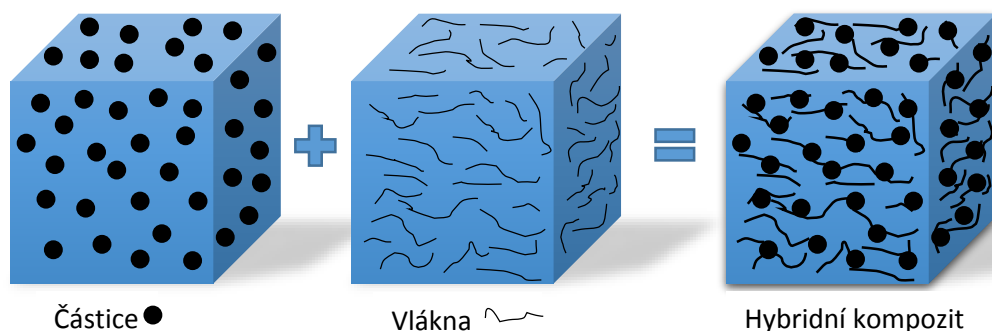
sřešních oken při zachování požadovaných mechanických vlastností. Plastisol, sloužící pro ochranu podvozků a k zakrývání svarů, je možno plnit až 50 % skleněnými kuličkami a snížit tak nejenom jeho cenu a hmotnost, ale také zvýšit jeho odolnost proti poškrábání [39].



**Obr. 13** Současné a potenciální automobilové aplikace kompozitů s dutými skleněnými kuličkami [10]

### 2.4.3 Hybridní kompozity

V důsledku požadavků dalšího zvýšení a obohacení vlastností kompozitů byly vyvinuty hybridní kompozity [21]. V inženýrské praxi je „hybrid“ používán ve spojitosti s „mixováním“ různých typů materiálů [43]. V případě polymerních kompozitů lze hybridace docílit několika způsoby. Buď se jedná o kombinaci jednoho druhu vyztužujících materiálů nebo plniv začleněných do směsi různých matic, popř. o kombinaci dvou nebo více druhů vyztužujících a plnicích materiálů přidaných do jediné matrice (viz obr. 14), nebo mohou být v jednom materiálu kombinovány obě tyto možnosti [3, 21, 43]. Nejčastěji je hybridní efekt docílen vzájemnou kombinací vláknových výztuží, jako jsou aramidová, uhlíková a skleněná vlákna [23, 44].



**Obr. 14** Schéma hybridního kompozitu

Výsledné chování hybridních kompozitů je dáno váženým součtem jednotlivých komponentů, ve kterých je příznivější rovnováha mezi jejich výhodami a jejich nevýhodami. Použitím hybridních kompozitů, které obsahují více druhů vláken, mohou výhody jednoho typu vlákna doplnit takové vlastnosti, které druhému vláknu chybí [21, 45]. Výhodou hybridních kompozitů lze nalézt v širokých možnostech ovlivnění jejich vlastností, jako je materiálová pevnost, tuhost, stabilita za vyšších teplot, tepelná nebo elektrická vodivost, hmotnost, cena a další [21, 44, 46].

Vlastnosti hybridních kompozitů, jako u všech ostatních kompozitů, jsou ovlivněny strukturními charakteristikami, zejména množstvím vyztužujících fází (vláken nebo částicových plniv), orientací a délkou vláken, typem vyztužujících fází, jejich poměrem, rozsahem promíchání v matrici, jejich uspořádáním a interakcí vyztužujících fází k matrici (adheze apod.) [21, 45, 46]. Pevnost hybridních kompozitů je také závislá na napětí při přerušení jednotlivých vláken. Nejlepších výsledků se dosáhne, pokud přidaná vlákna jsou kompatibilní. Úspěšné použití hybridních kompozitů je podmíněno chemickou, mechanickou a fyzikální stabilitou systému vlákno/matrice [45]. Lze uvést například kombinaci skleněných a uhlíkových vláken. Bylo zjištěno, že přidáním skleněných vláken do kompozitů, již vyztužených uhlíkovými vlákny, lze docílit nejen značného snížení ceny, ale také zvýšení rázové houževnatosti, popřípadě naopak, pokud přidáme uhlíková vlákna do již vyztuženého kompozitu skleněnými vlákny, dojde ke dramatickému zvýšení ohybového modulu. Marom a další zlepšili rázovou houževnatost a pevnost v ohybu přidáním aramidových vláken do epoxidové matrice vyztužené uhlíkovými vlákny. Chaudhuri a Garala odhalili, že pevnost v tahu kompozitu uhlík/epoxid může být zlepšena přidáním pouhých 15 % skleněných vláken [3, 43]. Lin a Jang zjistili, že rázová houževnatost dlouhovláknových kompozitů může být zlepšena přidáním krátkých kevlarových vláken do polymerní pryskyřice. Také se ukázalo, že přidáním malého množství krátkých kevlarových nebo uhlíkových vláken lze zlepšit vrubovou houževnatost [47].

Zvyšující množství disperzních fází má vliv na mechanické vlastnosti jenom do určité hodnoty (viz kapitola 2.2). Yilmazer studoval vlastnosti vstříkovaných hybridních kompozitů s akrylonitrilo-butadienovou-styrenovou matricí vyztuženou krátkými skleněnými vlákny a částicemi skla, přičemž bral v potaz efekt celkového obsahu disperzních fází (tzn. krátkých skleněných vláken a částic skla) a poměr obsahu skleněných vláken a plniv k celkovému obsahu disperzních fází na mechanické hodnoty hybridních kompozitů. V případě vysokého poměru, tzn., že množství částic skla je k celkovému obsahu disperzní fáze nízký, pevnost v tahu a ohybu se zvětšovala se zvyšujícím se obsahem výztuže a plniva do doby než bylo dosaženo vysoké hodnoty celkového obsahu disperzních fází. V případě nízkého poměru obsahu skleněných vláken k celkovému množství disperzní fáze, to znamená, že poměr obsahu částic skla k celkovému obsahu disperzní fáze je vysoký, pevnost v tahu a ohybu se snižovala se zvyšujícím se celkovým množstvím výztuže a plniva [3, 48].



Konkrétní případy využití hybridních kompozitů, lze nalézt u kompozitu s krátkými skleněnými vlákny a uhlíkovými vlákny (GF/CF) v epoxidové pryskyřici, který nahrazuje ocel pro potrubí a nádrže. Tyto díly mají vedle výborné odolnosti proti krípu, také dobrou odolnost proti korozi a dostatečnou pevnost. Spletenými vlákny AF/CF v epoxidové pryskyřici mohou být nahrazovány trubky a profily v automobilovém průmyslu (díky jejich výborné schopnosti absorbovat energii). Únavová pevnost kombinace GF/CF/epoxidová matrice v námořních aplikacích je mnohem větší než při použití pouze uhlíkových vláken [3, 43]. Velké naděje se vkládají do tzv. termostabilních struktur, které ani pod vlivem vysokých nebo naopak nízkých teplot nemění své rozměry. Při použití kompozitů se skleněnými nebo borovými vlákny je podélný součinitel tepelné roztažnosti pozitivní, při použití uhlíkových nebo aramidových vláken je součinitel tepelné roztažnosti negativní. Takže kombinací těchto druhů vláken, s pozitivní a negativní tepelnou roztažností, lze docílit nulového koeficientu tepelné roztažnosti, což se využívá především v kosmonautice [44].

Hybridní kompozity nemusejí obsahovat jen synteticky vyrobená vlákna. Vzhledem ke stále většímu kladení důrazu na životní prostředí se stávají velmi perspektivní přírodní vlákna. Mohou být vložena do biologicky rozložitelných polymerních materiálů, nazývaných biopolymery. Přírodními vlákny mohou být vlna, bavlna, len, konopí, kokosová, banánová nebo bambusová vlákna, dřevěná vlákna a mnoho dalších [21].

Jak bylo zmíněno výše, hybridního kompozitu lze za účelem vyztužení matrice docílit také kombinací matrice s další matricí. Zvýšením tuhosti matrice lze dosáhnout nižší křehkosti a zlepšení mechanických hodnot a zvýšení chemické odolnosti. Například smícháním dvou termoplastických matricí, lze dosáhnout kompozitu s vysokými mechanickými vlastnostmi: polyamidová matrice smíchána s polyethlenovou matricí pro skleněná vlákna. Dalšími kombinacemi termoplastických matricí jsou PC/ABS a PS/PC [21].

## 2.6 Aplikace polymerních kompozitů

Největšími výhodami polymerních kompozitních materiálů je mnohem nižší hustota (okolo 1 500 kg/m<sup>3</sup>) oproti ocelím (7 800 kg/m<sup>3</sup>) což vede k celkovému snižování hmotnosti dílů, které například u dopravních prostředků mají za následek nižších emisí a spotřeby pohonných hmot. Dalšími přednostmi je chemická odolnost, převážně odolnost proti korozi a s tím spojená vyšší životnost součástí a jejich nenáročná údržba, dobré elektrické a tepelné izolační vlastnosti, nízký útlum elektromagnetických vln nebo snadná změna barvy, popřípadě průsvitnost. Všechny tyto atributy určují polymerní kompozity do popředí k využití v konstrukčních aplikacích jako náhrada kovů [5].

V dnešní době jsou kompozitní materiály uplatňovány ve všech oborech a v některých získávají postupem času dominantní postavení [49]. Počátek využívání kompozitních materiálů najdeme především v leteckém, vesmírném a vojenském průmyslu z důvodu snížení

hmotnost dílů. Další využití kompozitů nalezneme v dopravě, sportovních potřebách, stavebnictví apod. Například v letecké dopravě je nízká hmotnost jedním z nejdůležitějších aspektů a v dnešní době tvoří až 50 % celého letadla kompozity. Menší i větší komerční letadla spoléhají na co nejnižší hmotnost a s tím související lepší využitelnost paliva. Také ve vesmíru lze nalézt mnoho aplikací, které využívají unikátních vlastností kompozitů. V kombinaci s vysoce tuhými uhlíkovými vlákny se používají kompozity na satelity nebo vesmírné stanice. Kromě výborné tuhosti a pevnosti uhlíkových vláken mají také minimální koeficient tepelné roztažnosti ve směru vláken, což je v případě, kdy jsou vesmírné stanice a satelity vystavovány slunečnímu světlu nebo naopak, kdy jsou na odvrácené straně odříznuty od slunečního svitu, velmi významnou vlastností, na kterou je kladen velký důraz. Podobně jako letecký průmysl, tak se i automobilový průmysl snaží využívat čím dál více kompozitních materiálů s cílem snížení hmotnosti automobilu, snížení spotřeby pohonných hmot a zvýšení ekologického hlediska [11, 49]. Například kompozity s využitím v nákladních automobilech snižují hmotnost nosných konstrukcí přepravních systémů (například nástavby nákladních vozů), což umožňuje zvýšit nákladové kapacity bez zvýšení zátěže náprav a díky svým schopnostem odolávat korozi jsou sníženy i náklady na údržbu [50]. V námořním průmyslu je největší problém s korozi. Polymerní kompozity tento problém více či méně minimalizují. Trupy lodí jsou tvořeny polymerní matricí se skleněnými vlákny. Své uplatnění najdou i v dopravní infrastruktuře. Cesty a mosty trpí vlivem silné koroze a je nutná jejich nákladná a zdlouhavá údržba. Kompozitní materiály nabízejí větší životnost spolu s menší údržbou, vzhledem k malé náchylnosti ke korozi. Lopatky větrné elektrárny jsou tvořeny kompozity, které snižují korozní problémy [11, 49]. Polymerní kompozitní materiály mají své uplatnění i v elektrotechnice, díky svým elektroizolačním vlastnostem. Používají se jako kabeláže, části trafostanic a elektromotorů apod. Ve sportovním odvětví najdou uplatnění díky své nízké hmotnosti a vysoké pevnosti například v podobě výtuh do lyží, hokejek a tenisových raket, tažených profilů pro lukostřelbu, apod. [50]. V lékařství jsou kompozity využívány např. při výrobě implantátů nebo pro medicínská zařízení. Používají se při určitých druzích zákroků, u nichž je používáno zobrazovacích technik jako rentgenu, počítačové tomografie nebo magnetické rezonance. V ortopedii jsou kompozity využívány v podobě absorbovatelných polymerů, pro výrobu kostních šroubů a destiček, používaných k fixaci malých kostí. Lze jimi nahradit kostní destičky (plotýnky) nebo je lze využít jako kyčelní náhradu [51].

## 2.7 Polyamidy

Polyamidy jsou semikrystalické materiály, vyrábějící se z několika monomerů různými způsoby [52]. Polyamidy se připravují převážně z dikarbonových kyselin (kyseliny adipové, sebakové) a diaminů (hexametyléndiaminu) nebo z omega-aminokyselin (11-aminoundekanové) nebo z laktamů (6-kaprolaktamu) [1]. Například jeden z nejpoužívanějších polyamidů, polyamid 66,

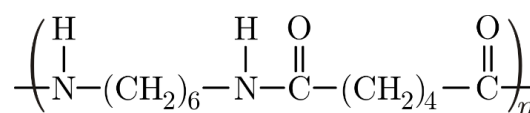
také znám pod názvem Nylon 66, je vyráběn polykondenzací dvou monomerů, kyseliny adipové (AA), obsahující 6 atomů uhlíku a hexametylendiaminu (HMD), obsahující též 6 atomů uhlíku, jak lze vidět na obrázku níže (viz obr. 15). Polyamid PA 610 vzniká z kyseliny sebakové, obsahující v molekule 6 atomů uhlíku a z hexametylendiaminu s 10 atomy uhlíku v molekule. Mezi další polyamidy patří polykaprolakram (PA 6, resp. Nylon 6), PA 11, PA 8 a další [1, 52, 54].

**Tab. 5** Vlastnosti polyamidů [54]

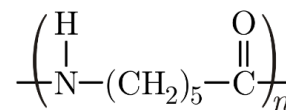
Vlastnosti polyamidů v závislosti na obsahu amidových skupin			
Typ polyamidu	Amidová skupina [%]	T <sub>m</sub> [°C]	Absorpce vody 24 hodin [%]
Polyamid 66	38	255	1.0 – 1.3
Polyamid 6	38	223	1.3 – 1.9
Polyamid 69	32	210	0.5
Polyamid 612	28	212	0.4
Polyamid 12	22	179	0.3

Polyamidy jsou výjimečné právě svými unikátními kombinovanými vlastnosti, nabízející vysokou mechanickou pevnost s dobrou chemickou odolností, a proto jsou jedny z nejčastěji používaných termoplastických materiálů. Kromě použití jako vláken polyamid 6 (Nylon 6) a polyamid 66 (Nylon 66), které tvoří přibližně 80 % celkové produkce všech polyamidů, se ve formě materiálu využívá téměř ve všech odvětvích průmyslu (v automobilovém průmyslu, elektrotechnickém a elektronickém, v obalovém a převážně strojírenském průmyslu) [54, 56].

Vlastnosti polyamidu jsou závislé především na jeho molekulové struktuře a chemickém složení [1, 54]. Polyamidy jsou charakterizovány amidovou skupinou (CONH), která je součástí hlavního polymerního řetězce [56]. Vlastnosti jsou ovlivněny přítomností vysoce polárních amidových skupin a délkou uhlovodíkových řetězců, což má za následek odolnost za vyšších teplot a dobré mechanické vlastnosti, ale také jednu z největších navlhavostí ze



**Nylon 66**



**Nylon 6**

**Obr. 15** Chemická struktura PA6 a PA 66 [54]

všech plastů (viz tab. 5). Čím delší jsou uhlovodíkové řetězce, tím je více potlačeno množství amidových skupin, a to vede jak k nižší absorpci vody, tak ke snížení teploty tání [54, 55]. A naopak, čím větší je podíl amidové skupiny, tzn. menší vzdálenost mezi -CONH- skupinami, tím se zvětšuje hustota, síla potřebná k oddělení jednotlivých molekul, teplota tání a s tím související mechanické vlastnosti za vyšších teplot, pevnost v tahu, tuhost, tvrdost a odolnost proti krípu, rozměrová stabilita a vyšší absorpce vody [54, 56]. Vliv amidových skupin na

teplotu tání a absorpci vody, lze vidět v tab. 5, kde jsou tyto závislosti rozebrány u několika vybraných druhů polyamidů [54, 55]. Další možností jak ovlivnit vlastnosti polyamidů je množstvím krystalické fáze a velikosti morfologické struktury [56].

Hlavním lišícím se prvkem jednotlivých typů polyamidů je hodnota teploty tání a schopnost absorpce vody v důsledku různé chemické struktury, protože na vlastnosti polyamidů má právě vlhkost a teplota zásadní vliv [56, 58]. Polyamidy přijímají snadno vodu, jak v přímém kontaktu, tak z atmosféry. Množství vlhkosti má negativní vliv na pevnost, modul pružnosti v tahu a tvrdost, naopak rázová houževnatost a tažnost se zvyšuje [52, 56]. Ve vlhkém prostředí a/nebo při zvyšující se teplotě elektrický odpor klesá [59].

**Tab. 6** Mechanické hodnoty polyamidů [54]

Porovnání mechanických vlastností polyamidů						
Typ polyamidu	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Mez pevnosti v tahu (MPa)	Modul pružnosti v tahu (GPa)	Modul pružnosti v ohybu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)	Rázová houževnatost IZOD (kJ/m <sup>2</sup> )
Polyamid 6	1.13	70	2.8	2.2	15	45-65
Polyamid 11	1.03	38	1.4	1.2	250	100
Polyamid 12	1.02	45	1.4	-	200	50-200
Polyamid 66	1.14	85	3.0	2.8	5	40-60
Polyamid 69	1.08	70	-	2.3	50	35
Polyamid 610	1.07	55	2.1	-	70	50
Polyamid 612	1.06	61	2.1	2.3	10	50
Polyamid 46	1.18	100	3.3	3.0	-	10

Polyamidy mají výbornou chemickou odolnost proti oleji, palivovým hmotám, tukům, nepolárním rozpouštědlům, slabým kyselinám, uhlovodíkům, aldehydům, některým alkoholům, esterům a glykolům [42, 55, 56, 59]. Naopak jsou napadány oxidačními činidly, fenoly, anorganickými a minerálními kyselinami, kyselinou sírovou, solnou, mravenčí, jsou rozpustné v krezolech, amidech kyselin aj. Polyamidy špatně odolávají metylen chloridu a především vodě, kde vlivem vysoké citlivosti na vlhkost, je potřeba před každým výrobním procesem materiál sušit [1, 54, 59]. Odolnost proti ohni je slabá, během hoření odkapávají [59]. Mají vyšší odolnost proti plamenu než polyolefiny (PP, PE), ale nejsou samozhášivé [58]. Polyamidy jsou citlivé na světlo a UV záření, proto musí být plněny přídatkem aditiva chránící jej proti UV záření [59].

Polyamidy vykazují také výborné mechanické vlastnosti (viz tab. 6), jako pevnost, tuhost a pružnost, vykazují dobrou teplotní stabilitu, nízké opotřebení, odolnost proti krípu, dobrou odolnost proti abrazi, výborné kluzné vlastnosti, dobré elektroizolační vlastnosti (elektroizolační vlastnosti jsou ovlivněny obsahem vlhkosti), snadnou zpracovatelnost

konvenčními metodami jako vstřikování, vytlačování, vyfukování, kde může dosáhnout až 50 % krystalické fáze. Polyamidy jsou využívány v automobilovém průmyslu jako rozvody přívodu vzduchu, chladiče, palivové nádrže, elektrické konektory, pouzdro olejového filtru, ochranná mřížka chladiče, ventilátor chladiče apod. [52, 54, 55, 56].

Při porovnání dvou nejpoužívanějších druhů polyamidů, PA 66 v porovnání s PA 6 má PA 66 větší tuhost a pevnost, ale také menší náchylnost k absorpci vody. Vlivem k teplotě tání a schopnosti dosáhnout vysokého krystalického podílu, je PA 66 schopen uchovávat si své dobré mechanické vlastnosti (tuhost a pevnost) i za vyšších teplot. Díky vysokému povrchovému odporu lze použít PA 66 jako izolaci [54].

Rozměrová stabilita a tuhost, pevnost a odolnost proti krípu může být zlepšena vyztužením skleněnými či uhlíkovými vlákny, kuličkami nebo minerálními plnivými [54, 58]. Kompozity na bázi polyamidů a skleněných vláken jsou používány např. k výrobě pedálů, krytů motorů, ručních vrtaček, apod. [52]. Polyamid 6 vyztužený uhlíkovými vlákny se využívá např. v leteckém průmyslu nebo při výrobě tenisových raket [56].

## 3 Experimentální část

### 3.1 Příprava zkušebních těles

Praktická část diplomové práce se zabývá vlivem vyztužujících fází na výsledné mechanické vlastnosti hybridních polymerních kompozitů. Polyamid 66 v tomto případě plnil roli matrice, která byla vyztužena skleněnými nebo uhlíkovými vlákny a skleněnými kuličkami v různém hmotnostním množství. Stanovení vlastností bylo provedeno v souladu s ČSN EN ISO 1874-2 a dle příslušných předměťových norem, zabývající se testováním mechanických vlastností [60]. Zkušební tělesa byla podrobena mechanickým zkouškám pro zjištění tahových a ohybových charakteristik, hodnot rázové houževnatosti a tvrdosti (viz kap. 3.2 ÷ 3.5).

Předem je nutné objasnit, jak bylo dosaženo daných hmotnostních podílů vyztužujících fází ve zkušebních tělesech hybridních kompozitů, které byly podrobeny experimentům. V první fázi, v rámci projektu TA04011009, byly mechanické vlastnosti zkoušeny na čisté polyamidové matici (PA 66) a na „klasických“ kompozitech. V tomto případě to znamená na kompozitech obsahujících pouze jeden druh výtzuže v různých hmotnostních podílech. Naměřené vlastnosti spolu s danými hmotnostními podíly výtzuží jsou uvedeny v příloze 2. Zde je patrné, že k přípravě kompozitů bylo použito několik polymerních matic na bázi PA 66: čistý polyamid Technyl A218 black 21N a matrice polyamidu s krátkými a dlouhými skleněnými vlákny a krátkými uhlíkovými vlákny, které byly zakoupeny přímo od výrobce. Kombinací čisté matrice Technyl A218 black 21N a matic obsahujících vyztužující vlákna byl vytvořen kompozit s požadovanými hmotnostními podíly konkrétních druhů plniv. Například kompozit PA 66 + 30 % GF byl vytvořen smícháním čisté polyamidové matrice PA 66 a matrice Technyl A218 V50 21N obsahující 50 % skleněných vláken, tak aby došlo k požadovanému hmotnostnímu podílu 30 % skleněných vláken v kompozitu. Tento postup byl proveden obdobně i u ostatních vláknových kompozitů. Co se týče kompozitů se skleněnými kuličkami, tak ty se připravovaly v laboratořích TU v Liberci samostatně kompaundací polyamidové matrice Technyl A218 black 21N spolu se 7 % aditiva Fusabond A560 (což je adhezni činidlo přidávané k polyamidu pro zvýšení soudružnosti mezi maticí a plnivem) a skleněnými dutými kuličkami tak, aby byl připraven kompozitní systém s hmotnostními podíly skleněných kuliček: 4 %, 6 %, 8 % a 12 %. K přípravě kompozitu byly použity skleněné mikrokuličky iM16K od firmy 3M, které jsou vhodné právě do polyamidových matic zpracovávaných vstřikováním. Granulát byl zhotoven metodou studené granulace na granulační lince ZAMAC EHP – 2x130di. V důsledku zamezení poškození skleněných kuliček vlivem smykového namáhání při plastifikaci PA matrice byly skleněné kuličky přidávány až do přední pozice šneku v tavící komoře. Pro ověření obsahu plniva se granule spalovaly v peci při teplotě 850 °C po dobu 20



minut dle ČSN EN ISO 3451-4. Množství plniva, resp. nespalitelných zbytků odpovídalo předpokládanému obsahu plniva v daném granulátu s max. odchylkou 5 %.

V druhé fázi projektu TA04011009, která dílčím způsobem souvisí s předloženou diplomovou prací, byly zkoumány mechanické vlastnosti hybridních kompozitů připravovaných právě kombinacemi „klasických“ kompozitů z první etapy řešení projektu. Všechny naměřené hodnoty hybridních kompozitů jsou uvedeny v příloze 3, spolu s průměrnými hodnotami a směrodatnými odchylkami.

### 3.1.1 Vstřikování zkušebních těles

Zkušební tělesa ve tvaru víceúčelových zkušebních těles dle ČSN EN ISO 3167 byla zhotovena technologií vstřikování v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 1874-2 na vstřikovací stroji ARBURG 270 S 400-100 (viz obr. 16). K výrobě zkušebních těles bylo použito ISO formy typu A (dvojnásobná dutina formy) s jednou dělicí rovinou a kuželovým vtokem (viz obr. 17). Zkušební vzorky pro zkoušky rázové houževnatosti a ohybových vlastností byly upraveny mechanickým obrobením střední části víceúčelového zkušebního tělesa. Chlazení formy bylo zajištěno pomocí temperačního média (vody) cirkulující v temperačních kanálech v oblasti tvarových dutin. Použitý granulát byl před vstřikováním sušen ve vakuové sušárně Maguire při teplotě 80 °C po dobu 4 hodin v souladu s materiálovou specifikací. Celý proces vstřikování probíhal při standartních podmínkách (23 °C a 50 % relativní vlhkosti).



**Obr. 16** Vstřikovací lis ARBURG 270 S 400-100



**Obr. 17** ISO forma typu A

Parametry vstřikování byly nastavovány dle materiálu s největším % plnění a to pro každý typ plniva zvlášť. Optimalizované parametry pak byly stejné i pro materiály s nižším % plnění, tak aby výsledky mechanických zkoušek byly co nejméně ovlivněny technologickými parametry. Jednotlivé parametry byly voleny na základě normy předepisující výrobu

zkušebních těles z PA (ČSN EN ISO 1874-2), doporučení výrobce materiálu a na základě eliminace vnějších vad (zejména odstranění propadlin, či tvorby přetoků).

**Tab. 7** Technologické podmínky vstřikování

Parametry	Složení hybridního kompozitu		
	PA + CF/GB	PA + GF/GB	PA + LGF/GB
Teplota taveniny (viz teplotní profil tavící komory) [°C]	310	310	305
Teplota temperačního média formy [°C]	80	80	80
Doba cyklu [s]	40	40	40
Doba dotlaku [s]	15	15	15
Velikost dotlaku [bar]	700	720	610
Velikost dávky [cm <sup>3</sup> ]	40	40	40
Bod přepnutí na dotlak [cm <sup>3</sup> ]	13	13	13
Vstřikovací rychlost [cm <sup>3</sup> /s]	35	35	35
Teplotní profil tavící komory stroje [°C]			
Násypka	40	40	40
4. zóna	290	285	290
3. zóna	300	295	300
2. zóna	305	300	305
1. zóna	305	300	305
tryska	310	305	310

### 3.1.2 Podmínky kondicionace zkušebních těles

Jak bylo vysvětleno v teoretické části diplomové práce, tak na vlastnosti polyamidů má zásadní vliv množství vlhkosti přítomné v materiálu. Před hodnocením mechanických vlastností hybridních kompozitů byla proto všechna zkušební tělesa kondicionována. Kondicionací bylo dosaženo specifického obsahu vlhkosti ve všech zkoumaných vzorcích a tím i jejich rovnovážného stavu, při kterém lze zajistit stejné podmínky zkoušení pro všechny vzorky. Pro dosažení tohoto stavu bylo použito postupu urychlené kondicionace, která probíhá za vyšších teplot podle ČSN EN ISO 1110 v souladu s normou ČSN EN ISO 1874-2 [60, 61].



**Obr. 18** Uložení zkušebních těles v klimatické komoře Votsch VC 0018



Zkušební tělesa, byla vložena do předehřáté klimatizační komory Votsch VC 0018 (viz obr. 18) o teplotě  $(70 \pm 1) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $(62 \pm 1) \%$  po dobu 10 dní, což je dostatečná doba pro dosažení rovnovážného stavu alespoň z 95 %. Následné hodnocení mechanických vlastností probíhalo ve standartním prostředí 23/50, tedy při teplotě  $23 ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti 50 %.

### 3.2 Stanovení tahových vlastností

Mechanická zkouška tahem probíhá při jednoosém tahovém zatížení zaznamenávající závislost tahového jednoosého napětí na poměrném prodloužení. Tahová zkouška byla použita za účelem zjištění meze pevnosti v tahu ( $\sigma_m$ ), poměrného prodloužení při přetržení ( $\varepsilon_b$ ) a modulu pružnosti v tahu ( $E_t$ ). Tvar a rozměry zkušebních vzorků odpovídaly víceúčelovým zkušební tělesům, které jsou v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1 [62].

Měření tahových vlastností mělo dvě fáze. První fází bylo zjištění meze pevnosti v tahu a poměrného prodloužení při přetržení. Měření bylo provedeno na trhacím stroji TIRA test 2300 se snímací hlavou 100 kN (viz obr. 19) a s využitím softwaru LabNet, ve kterém bylo potřeba nastavit rozměry tělesa, počáteční měřenou délku ( $L_0 = 80 \text{ mm}$ ), rychlost zatěžování ( $v = 5 \text{ mm/min}$ ) a další parametry, provázející zkoušku ČSN EN ISO 527-2. [63].

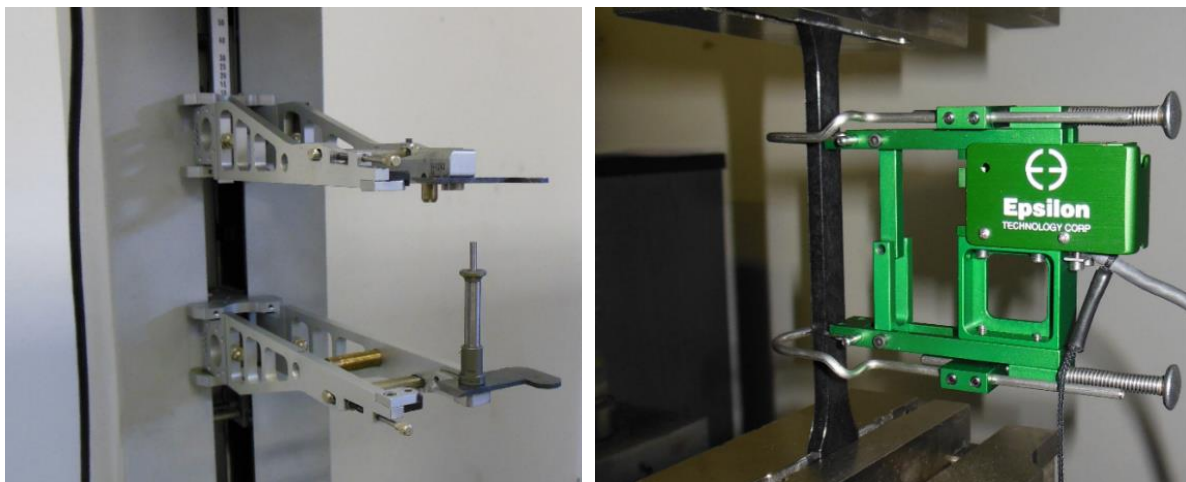
Po nastavení všech potřebných hodnot bylo zkušební těleso upnuto do upínacích čelistí tak, aby osa tělesa byla totožná s osou čelistí a směrem protahování. Neméně důležité bylo také řádně upevnění tělesa v upínacích čelistech, tak aby nedocházelo k jeho vyklouzávání. Po upnutí do čelistí se na zkušební těleso připevnil externí průtahoměr MFN A Standard 300 (viz obr. 20), připevněný na počáteční měřenou délku zkoušeného vzorku. Následně se stroj spustil a zatěžoval zkušební těleso ve směru osy rychlostí  $5 \text{ mm/min}$  do doby, než došlo k jeho přetržení. Během celého testu byly zaznamenávány: zatěžující síla a změna počáteční délky (80 mm), z nichž byla stanovena mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení při přetržení.

Druhým krokem při měření tahových vlastností bylo zjištění modulu pružnosti v tahu, který software LabNet vyhodnocuje z průběhu zkoušky jako sečnu křivky napětí a poměrného prodloužení při hodnotách  $\varepsilon_1 = 0,05 \%$  a  $\varepsilon_2 = 0,25 \%$ . Zjišťování hodnoty modulu pružnosti probíhalo podobně jako u meze pevnosti v tahu (velikost snímací hlavy 10 kN), s tím rozdílem,



**Obr. 19** Měřicí stroj  
TIRAtest 2300

že rychlost zkoušení byla 1 mm/min a na zkoušený vzorek se připevnil externí průtahoměr EPSILON Tech 3542 s počáteční délkou  $L_0 = 50$  mm (viz obr. 20).



Obr. 20 Vlevo průtahoměr MFN A Standart, vpravo průtahoměr Epsilon

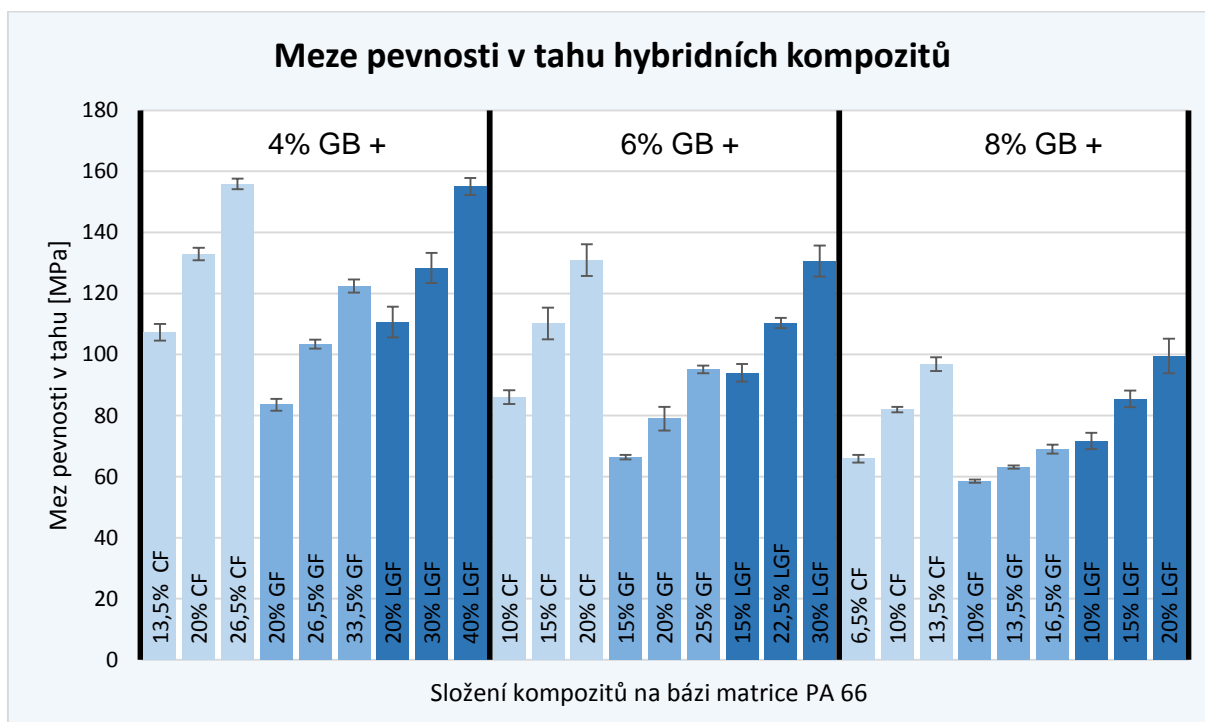
Všechny naměřené hodnoty z tahové zkoušky byly opakovány na deseti vzorcích pro každou kombinaci hybridních kompozitů. Jejich průměrné hodnoty spolu se směrodatnými odchylkami jsou zobrazeny v tab. 8, dílčí hodnoty pak v příloze 3 na str. P8 ÷ P10. Pro porovnatelnost a lepší přehlednost jsou výsledky zobrazeny také graficky na obr. 21 ÷ obr. 23. Přiloženy jsou i hodnoty z první fáze projektu TAČR (viz tab. 9 a obr. 24 ÷ obr. 26), které budou využity v kapitole, zabývající se diskusí výsledků.

Tab. 8 Hodnoty tahových charakteristik hybridních kompozitů v závislosti na druhu a množství výztuže

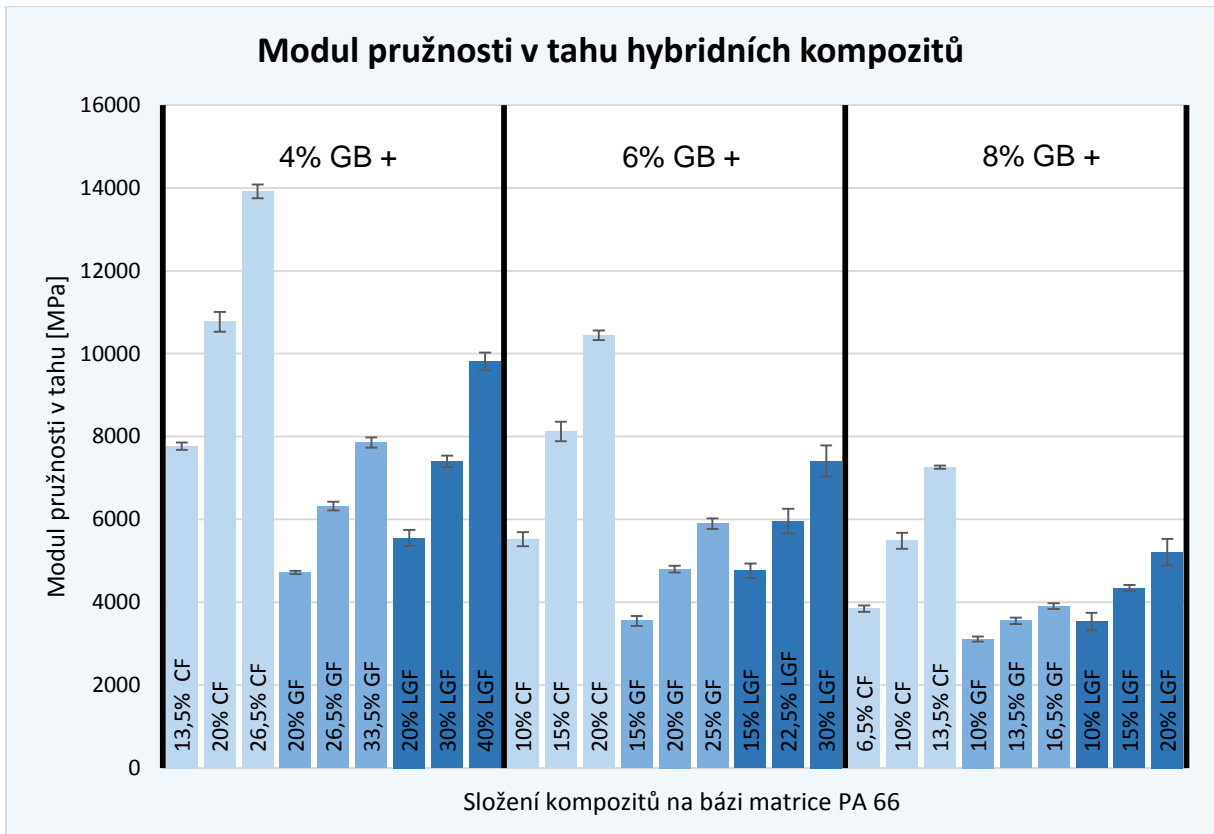
Výztuž	$\sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]
4%GB + 13,5%CF	107,3 ± 2,7	7767 ± 86	6,2 ± 0,3
4%GB + 20%CF	132,9 ± 2,1	10770 ± 239	4,7 ± 0,3
4%GB + 20%GF	83,5 ± 2,0	4718 ± 41	9,6 ± 0,5
4%GB + 20%LGF	110,6 ± 5,0	5552 ± 194	3,4 ± 0,2
4%GB + 26,5%CF	155,9 ± 1,7	13917 ± 168	3,4 ± 0,2
4%GB + 26,5%GF	103,4 ± 1,5	6322 ± 105	6,8 ± 0,5
4%GB + 30%LGF	128,4 ± 4,9	7398 ± 140	3,4 ± 0,4
4%GB + 33,5%GF	122,5 ± 2,1	7859 ± 125	4,7 ± 0,2
4%GB + 40%LGF	155,0 ± 2,8	9814 ± 210	2,6 ± 0,1
6%GB + 10%CF	86,1 ± 2,2	5524 ± 170	7,3 ± 0,2
6%GB + 15%CF	110,2 ± 5,2	8122 ± 237	5,2 ± 0,5

**Tab. 9** Hodnoty tahových charakteristik hybridních kompozitů v závislosti na druhu a množství výztuže - pokračování

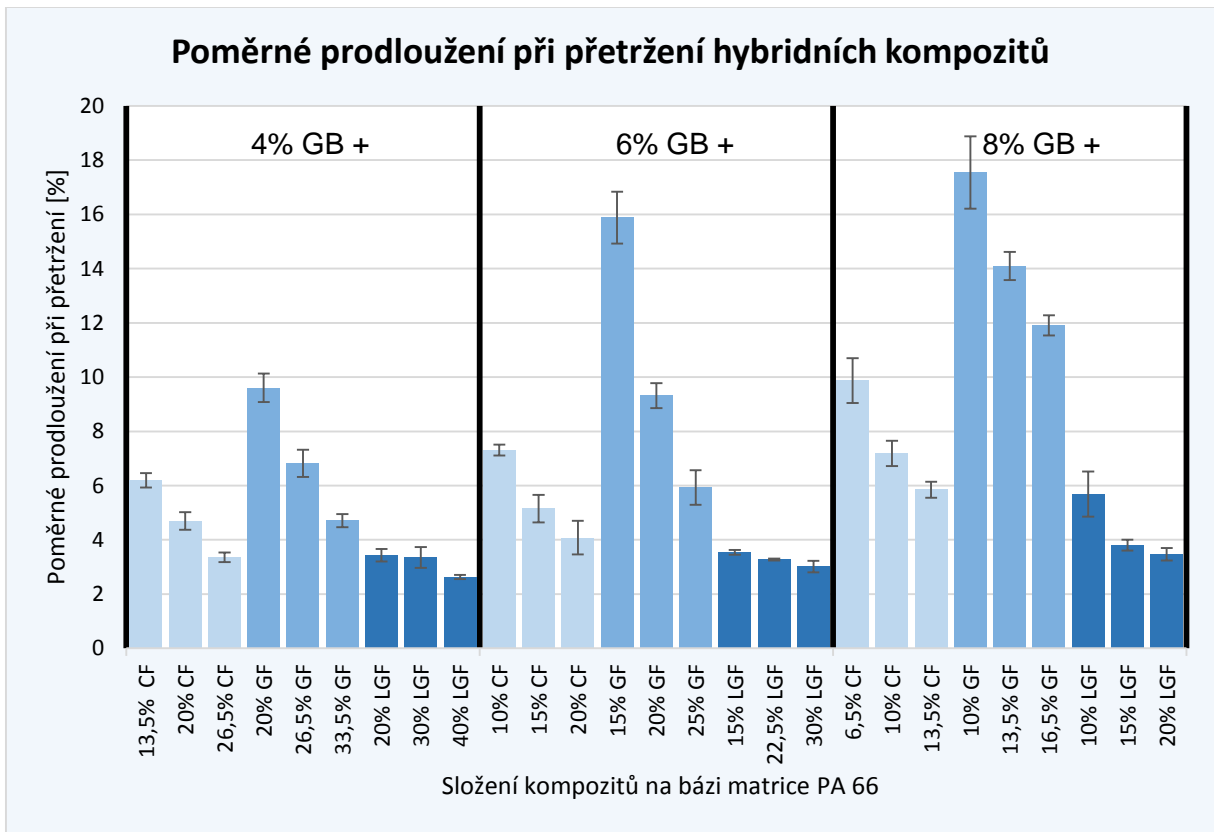
Výztuž	$\sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]
6%GB + 15%GF	66,4 ± 0,8	3552 ± 120	15,9 ± 1,0
6%GB + 15%LGF	94,0 ± 2,9	4762 ± 171	3,5 ± 0,1
6%GB + 20%CF	131,0 ± 5,2	10444 ± 117	4,1 ± 0,6
6%GB + 20%GF	79,0 ± 3,9	4801 ± 82	9,3 ± 0,5
6%GB + 22,5%LGF	110,3 ± 1,7	5957 ± 298	3,3 ± 0,0
6%GB + 25%GF	95,1 ± 1,2	5898 ± 125	5,9 ± 0,6
6%GB + 30%LGF	130,6 ± 5,1	7411 ± 376	3,0 ± 0,2
8%GB + 6,5%CF	65,8 ± 1,3	3848 ± 77	9,9 ± 0,8
8%GB + 10%CF	82,0 ± 0,9	5482 ± 192	7,2 ± 0,5
8%GB + 10%GF	58,6 ± 0,5	3114 ± 61	17,6 ± 1,3
8%GB + 10%LGF	71,7 ± 2,7	3534 ± 211	5,7 ± 0,8
8%GB + 13,5%CF	96,9 ± 2,2	7262 ± 42	5,9 ± 0,3
8%GB + 13,5%GF	63,1 ± 0,5	3553 ± 78	14,1 ± 0,5
8%GB + 15%LGF	85,5 ± 2,7	4343 ± 73	3,8 ± 0,2
8%GB + 16,5%GF	69,0 ± 1,5	3907 ± 71	11,9 ± 0,4
8%GB + 20%LGF	99,5 ± 5,7	5210 ± 318	3,5 ± 0,2



**Obr. 21** Vliv přidávaných vyztužujících fází na hodnoty meze pevnosti v tahu hybridních kompozitů



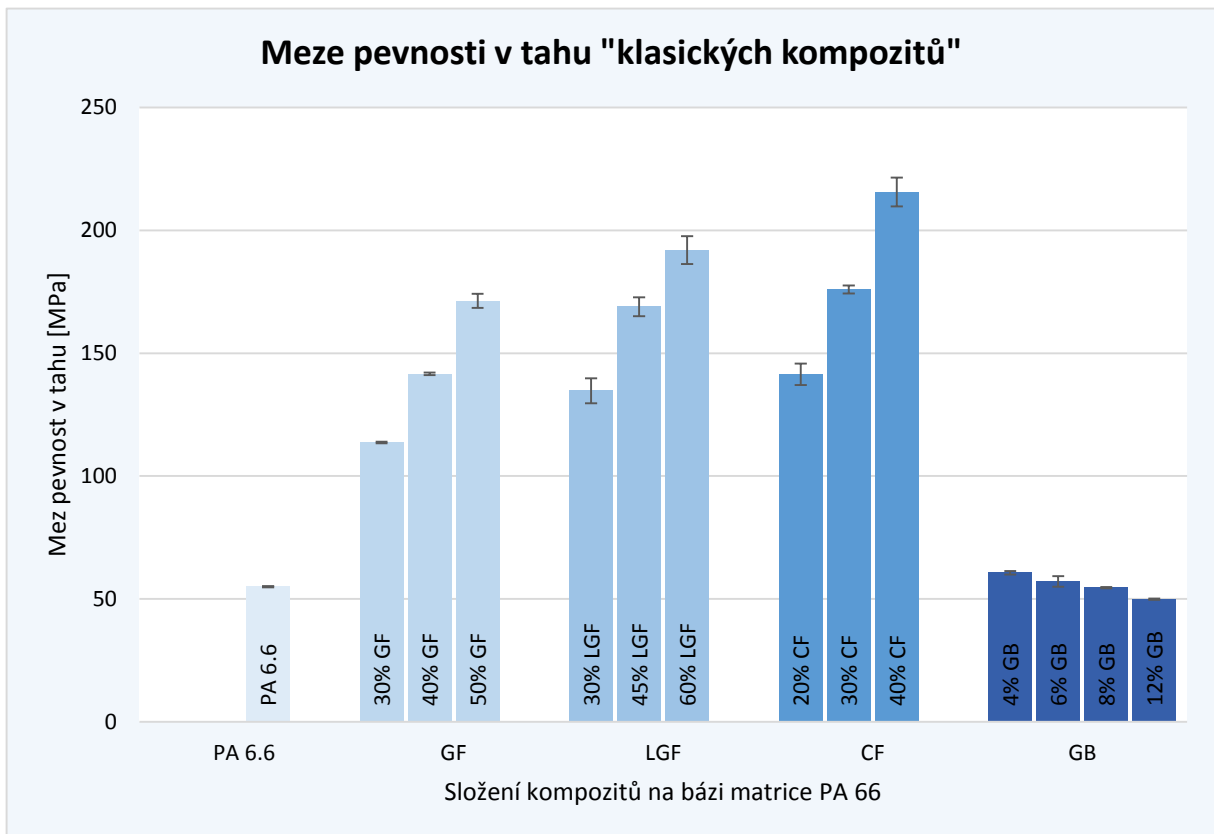
**Obr. 22** Vliv přidanych vyztužujících fází na hodnoty modulu pružnosti v tahu hybridních kompozitů



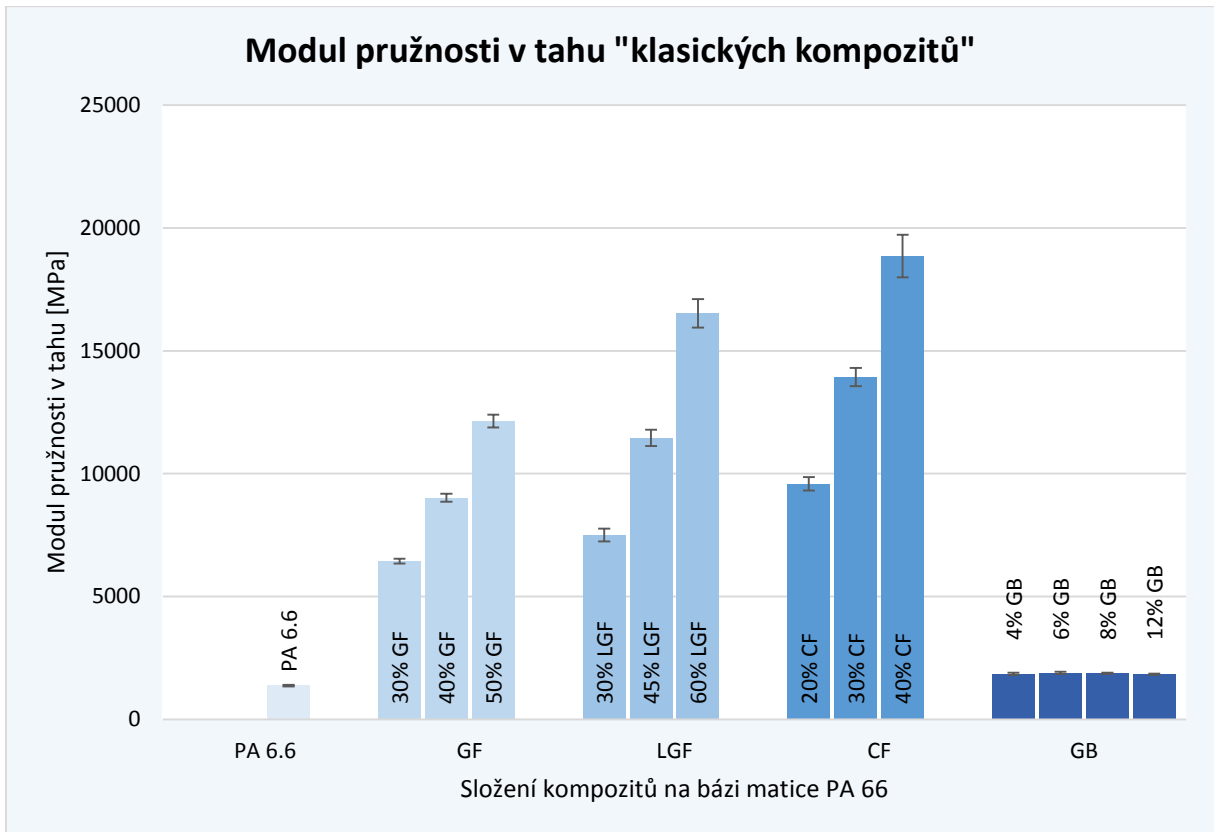
**Obr. 23** Vliv přidanych vyztužujících fází na hodnoty poměrného prodloužení při přetržení hybridních kompozitů

**Tab. 10** Hodnoty tahových charakteristik „klasických kompozitů“ v závislosti na druhu a množství výztuže

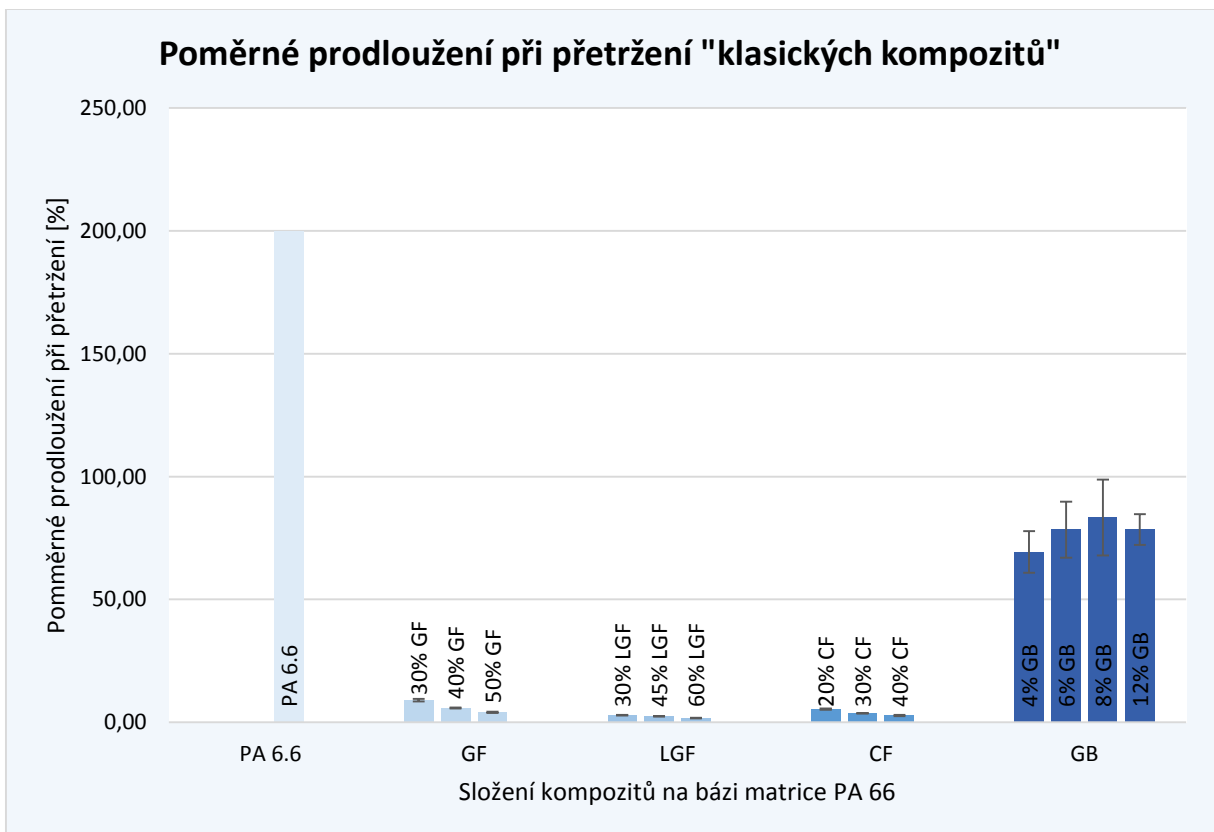
Výztuž		Matrice	$\sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]
PA 66		Technyl A 218 black 21N	55,0 ± 0,2	1376 ± 33	více jak 200 %
PA 66	30% GF	Technyl A218 21N +	113,7 ± 0,4	6448 ± 97	9,0 ± 0,5
	40% GF	Technyl A218 V50 21N	141,6 ± 0,5	9025 ± 162	5,8 ± 0,2
	50% GF	Technyl A218 V50 21N	171,3 ± 2,9	12147 ± 261	4,1 ± 0,3
PA 66	30% LGF	Celstran GF60-02 +	134,7 ± 5,1	7504 ± 261	2,9 ± 0,1
	45% LGF	Technyl A218 21N	168,9 ± 3,8	11456 ± 331	2,5 ± 0,1
	60% LGF	Celstran GF60-02	192,0 ± 5,7	16527 ± 583	1,8 ± 0,1
PA 66	20% CF	Luvocom 1/CF/40 +	141,4 ± 4,3	9590 ± 274	5,4 ± 0,3
	30% CF	Technyl A218 21N	175,9 ± 1,6	13929 ± 371	3,7 ± 0,1
	40% CF	Luvocom 1/CF/40	215,6 ± 5,8	18853 ± 865	2,8 ± 0,2
PA 66	4% GB	Technyl A 218 black 21N	60,7 ± 0,7	1860 ± 46	69,3 ± 8,4
	6% GB		57,1 ± 2,2	1896 ± 44	78,4 ± 11,4
	8% GB		54,6 ± 0,2	1878 ± 22	83,3 ± 15,5
	12% GB		49,9 ± 0,2	1834 ± 26	78,5 ± 6,2



**Obr. 24** Vliv přidanych vyztužujících fází na hodnoty meze pevnosti v tahu „klasických kompozitů“



**Obr. 25** Vliv přidanych vyztužujících fází na hodnoty modulu pružnosti v tahu „klasických kompozitů“



**Obr. 26** Vliv přidanych vyztužujících fází na hodnoty poměrného prodloužení při přetržení „klasických kompozitů“

### 3.3 Stanovení ohybových vlastností

Pomocí ohybové zkoušky lze zjistit pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu a další závislosti mezi napětím a deformací zkoumaného vzorku při stanovených podmínkách zkoušení v souladu s normou ČSN EN ISO 178 [64]. Zkoumané vzorky měly předepsaný tvar hranolu o rozměrech 80 x 10 x 4 mm, které odpovídaly požadavkům normy ČSN EN ISO 178 [64]. Použité vzorky byly získány ze střední části víceúčelových těles mechanickým obrobením. Zkouška ohybem byla prováděna ve standardním prostředí 23/50 na zařízení HOUNSFIELD H10KT (viz obr. 27) se snímací hlavou o velikosti 500 N a 10 kN a měřícím softwarem QMAT.

Vyšetřovaná tělesa obdélníkového průřezu byla uložena jako nosník na dvou podpěrách se vzdáleností  $L_p = 64$  mm, která je stanovena podle vztahu  $L_p = (16 \pm 1) \times h$ , kde  $h$  je tloušťka vzorku (4 mm). Následně byly vzorky zatěžovány uprostřed rozpětí podpěr pohybujeícím se příčnickem s konstantní rychlostí 2 mm/min (třibodový ohyb – viz obr. 28). Zkouška probíhala do doby, než došlo k prasknutí vzorku nebo než byla dosažena maximální hodnota napětí. V průběhu zkoušky byla zaznamenávána závislost napětí v ohybu ( $\sigma_{fM}$ ) na deformaci ohybem ( $\varepsilon_f$ ) a hodnoty napětí ( $\sigma_{fM1}$ ,  $\sigma_{fM2}$ ) při deformacích ohybem  $\varepsilon_{f1} = 0,05$  % a  $\varepsilon_{f2} = 0,25$  %, pomocí kterých byl vypočítán modul pružnosti v ohybu  $E_f$  dle rovnice (1). Pro každou kombinaci kompozitů bylo provedeno 5 měření a všechny průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek jsou zobrazeny v tab. 11, resp. graficky na obr. 29 a obr. 30. Na obr. 31, obr. 32 a v tab. 12 jsou opět uvedeny i převzaté hodnoty ohybových charakteristik „klasických kompozitů“, které byly použity v kap. 4 pro porovnání a diskusi naměřených hodnot u hybridních kompozitů.



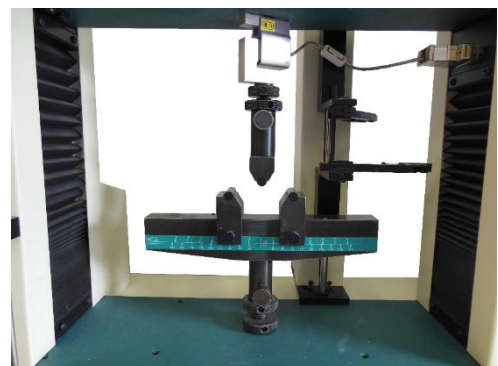
Obr. 27 Měřicí přístroj HOUNSFIELD H10KT

$$E_f = \frac{\sigma_{fM2} - \sigma_{fM1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}$$

(1)

kde je:

- $E_f$  modul pružnosti v ohybu [MPa],
- $\sigma_{fM1}$  napětí v ohybu při deformaci 0,05 % [MPa],
- $\sigma_{fM2}$  napětí v ohybu při deformaci 0,25 % [MPa],
- $\varepsilon_{f1}$  deformace ohybem 0,05 %,
- $\varepsilon_{f2}$  deformace ohybem 0,25 %.



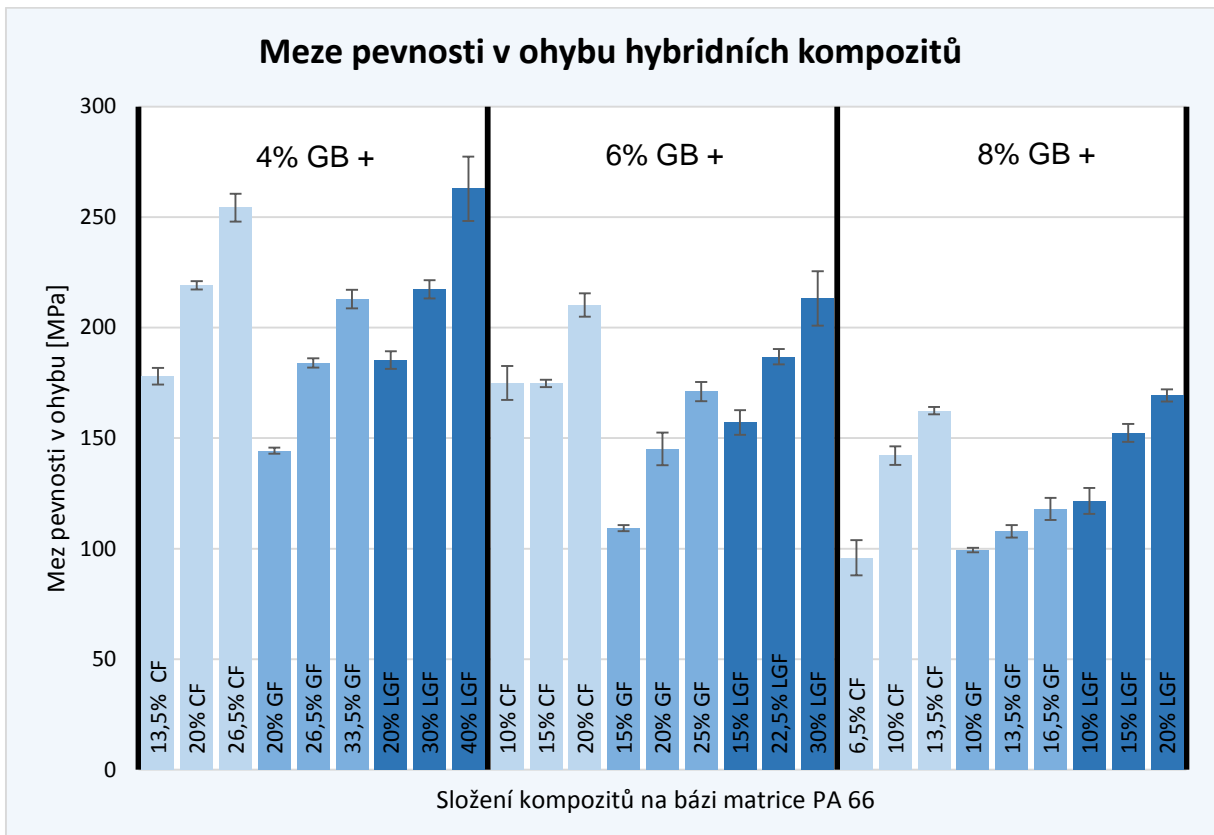
Obr. 28 Třibodový ohyb



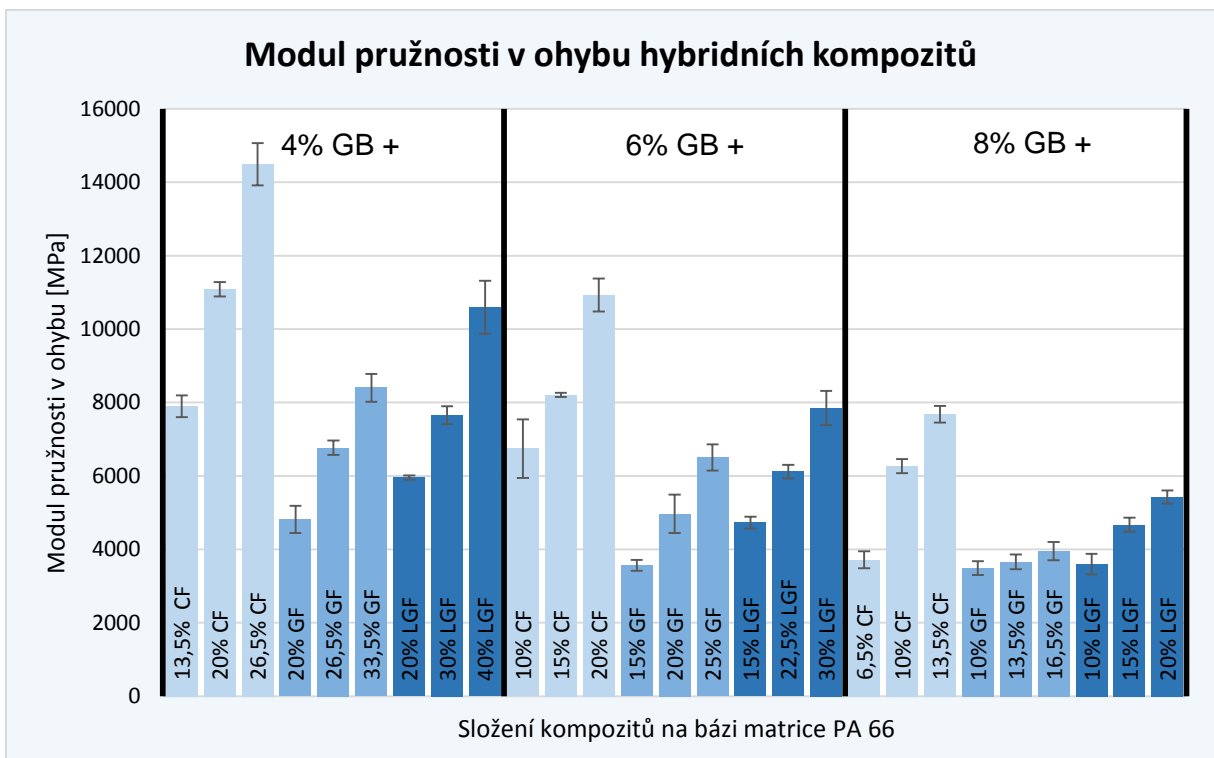
**Tab. 11** Hodnoty ohybových charakteristik hybridních kompozitů v závislosti na druhu a množství výztuže

Výztuž	$\sigma_{fm}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
4%GB + 13,5%CF	178,0 ± 3,8	7896 ± 298
4%GB + 20%CF	219,2 ± 1,9	11088 ± 195
4%GB + 20%GF	144,3 ± 1,4	4815 ± 372
4%GB + 20%LGF	185,4 ± 3,9	5952 ± 59
4%GB + 26,5%CF	254,3 ± 6,3	14490 ± 574
4%GB + 26,5%GF	184,0 ± 2,1	6744 ± 797
4%GB + 30%LGF	217,4 ± 4,2	7656 ± 245
4%GB + 33,5%GF	212,9 ± 4,2	8400 ± 380
4%GB + 40%LGF	262,9 ± 14,6	10596 ± 717
6%GB + 10%CF	175,0 ± 7,7	6744 ± 797
6%GB + 15%CF	174,7 ± 1,6	8208 ± 59
6%GB + 15%GF	109,3 ± 1,3	3564 ± 150
6%GB + 15%LGF	157,1 ± 5,6	4728 ± 163
6%GB + 20%CF	210,3 ± 5,3	10932 ± 450
6%GB + 20%GF	145,1 ± 7,4	4968 ± 520
6%GB + 22,5%LGF	186,9 ± 3,5	6120 ± 186
6%GB + 25%GF	171,1 ± 4,4	6500 ± 358
6%GB + 30%LGF	213,2 ± 12,3	7848 ± 465
8%GB + 6,5%CF	95,9 ± 8,0	3716 ± 233
8%GB + 10%CF	142,1 ± 4,2	6267 ± 189
8%GB + 10%GF	99,4 ± 1,0	3488 ± 185
8%GB + 10%LGF	121,6 ± 5,9	3600 ± 280
8%GB + 13,5%CF	162,4 ± 1,7	7680 ± 228
8%GB + 13,5%GF	107,9 ± 2,8	3660 ± 204
8%GB + 15%LGF	152,4 ± 4,0	4671 ± 193
8%GB + 16,5%GF	118,0 ± 5,0	3951 ± 251
8%GB + 20%LGF	169,3 ± 2,7	5424 ± 176





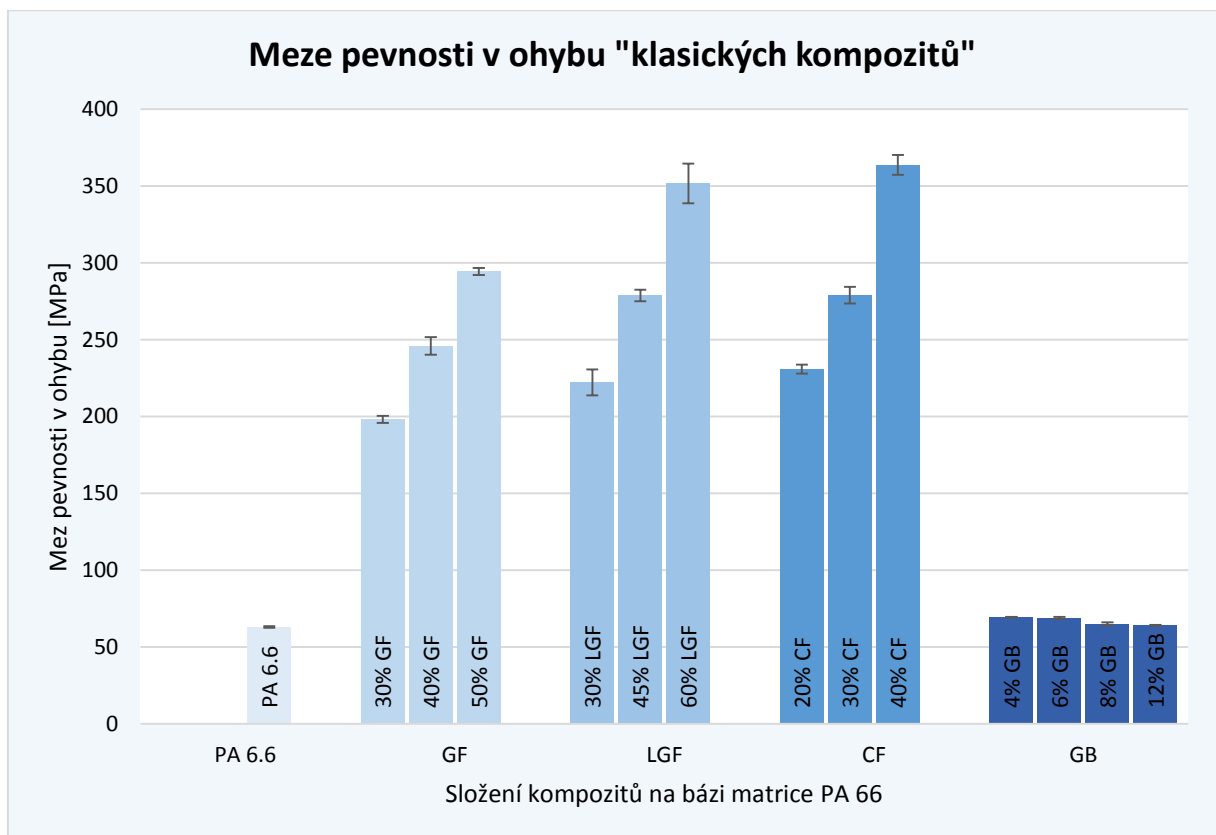
**Obr. 29** Vliv přidanych vyztužujících fází na hodnoty meze pevnosti v ohybu hybridních kompozitů



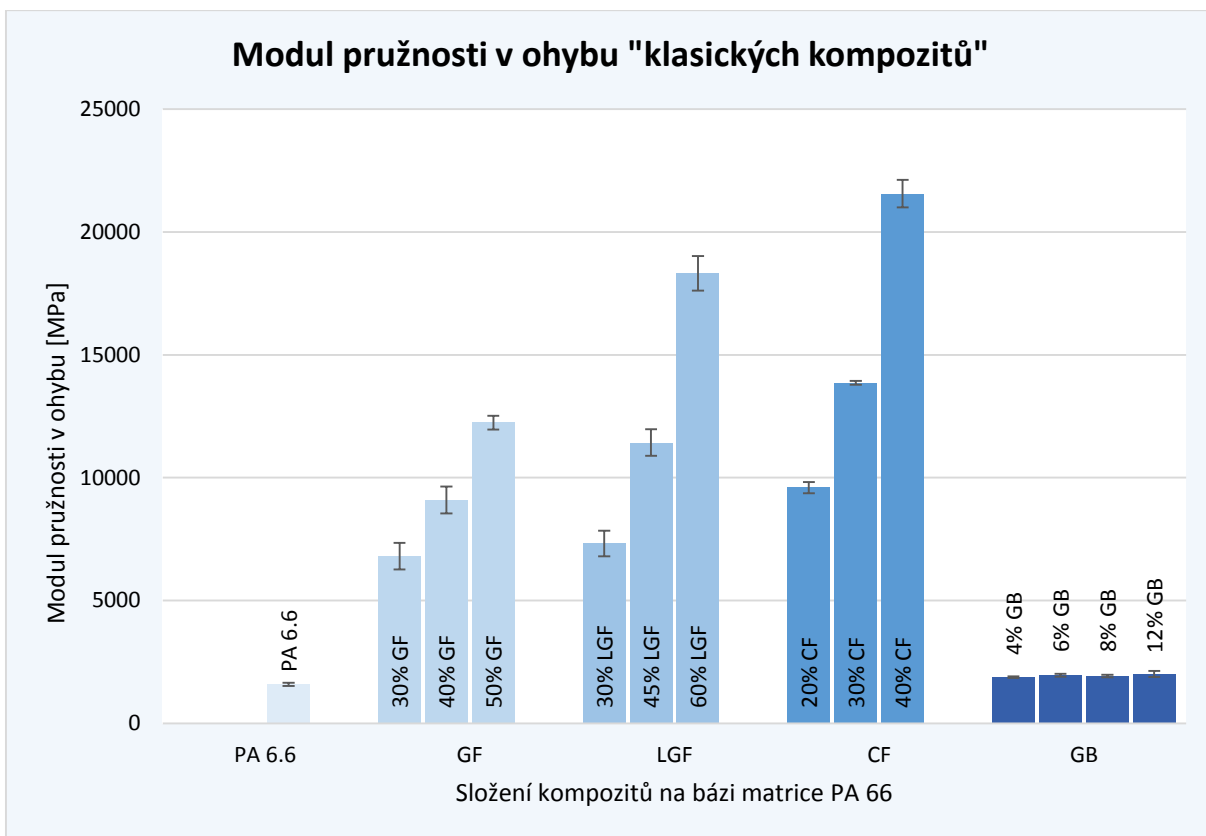
**Obr. 30** Vliv přidanych vyztužujících fází na hodnoty modulu pružnosti v ohybu hybridních kompozitů

**Tab. 12** Hodnoty ohybových charakteristik „klasických kompozitů“ v závislosti na druhu a množství výztuže

Výztuž	Matrice	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
PA 66	Technyl A 218 black 21N	63,0 ± 0,4	1591 ± 61
PA 66	30% GF	198,1 ± 2,3	6804 ± 542
	40% GF	246,0 ± 5,8	9096 ± 549
	50% GF	294,5 ± 2,3	12240 ± 278
PA 66	30% LGF	222,1 ± 8,4	7320 ± 520
	45% LGF	278,8 ± 3,7	11430 ± 540
	60% LGF	351,8 ± 12,9	18315 ± 706
PA 66	20% CF	230,9 ± 2,9	9600 ± 228
	30% CF	279,1 ± 5,4	13860 ± 74
	40% CF	363,8 ± 6,4	21565 ± 561
PA 66	4% GB	69,4 ± 0,3	1884 ± 38
	6% GB	68,9 ± 0,7	1966 ± 60
	8% GB	65,0 ± 0,9	1931 ± 48
	12% GB	64,1 ± 0,3	2018 ± 122



**Obr. 31** Vliv přidávaných vyztužujících fází na hodnoty meze pevnosti v ohybu „klasických kompozitů“



**Obr. 32** Vliv přidávaných vyztužujících fází na hodnoty modulu pružnosti v ohybu „klasických kompozitů“

### 3.4 Stanovení rázové houževnatosti Charpy

Rázová houževnatost udává, jaké množství energie bylo spotřebováno k přeražení zkušebního tělesa o definovaných rozměrech. Vyjadřuje tedy vztah mezi energií a plochou v jednotkách  $\text{kJ/m}^2$ . Pro zkoumání rázové houževnatosti byla zvolena metoda Charpy, protože je vhodná na tuhé a vyztužené termoplasty. Zkouška rázové houževnatosti byla prováděna na zařízení Resil 5.5 CEAST (viz obr. 33) ve standardním prostředí 23/50. Rozměry zkušebního tělesa a parametry rázové zkoušky byly v souladu s mezinárodní normou ČSN EN ISO 179-1 [65]. Zkušební tělesa, o rozměrech  $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}$ , byla získána mechanickým obráběním ze střední části víceúčelových zkušebních těles dle ČSN EN ISO 2818 [66].



**Obr. 33** Měřicí zařízení Resil 5.5 CEAST

Před samotným měřením bylo nutné zařízení zkalibrovat a zvolit vhodnou velikost kladiva. Rázové kladivo bylo zvoleno tak, aby bylo schopno dosáhnout předepsané rázové rychlosti a aby absorbovaná energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa ležela v rozmezí  $(10 \div 80) \%$  celkové energie kladiva. Dalším potřebným krokem bylo zjištění ztrátové energie způsobené mechanickým třením a odporem vzduchu. Tato energie byla zjištěna spuštěním kladiva na prázdno, tzn. bez umístěného

zkušebního tělesa na podporách. Výsledná ztrátová energie pak byla zohledněna při vyhodnocování celkové spotřebované energie potřebné k přeražení vzorku.

Po nastavení a zkalibrování zařízení se rázové kladivo zvedlo do výchozí polohy a zajistilo. Zkušební tělesa byla umístěna vodorovně na dvou podporách a přeražena úderem rázového kladiva, jehož pohyb vedl středem vzdálenosti mezi podpěrami na užší stranu vzorku. Zařízení následně vyhodnotilo spotřebovanou energii k přeražení daného vzorku ( $E_c$ ) a podle rovnice (2) byla vypočtena rázová houževnatost. Pro každou kombinaci kompozitu bylo provedeno 10 měření a ve všech případech došlo k úplnému přeražení, tedy k přeražení typu C. Výsledné průměrné hodnoty pro všechny měřené kombinace spolu se směrodatnými odchylkami jsou zobrazeny v tab. 13, resp. graficky na obr. 34. Opět jsou v této kapitole přiloženy hodnoty rázové houževnatosti „klasických kompozitů“ pro pozdější porovnání (viz tab. 14 a obr. 35).

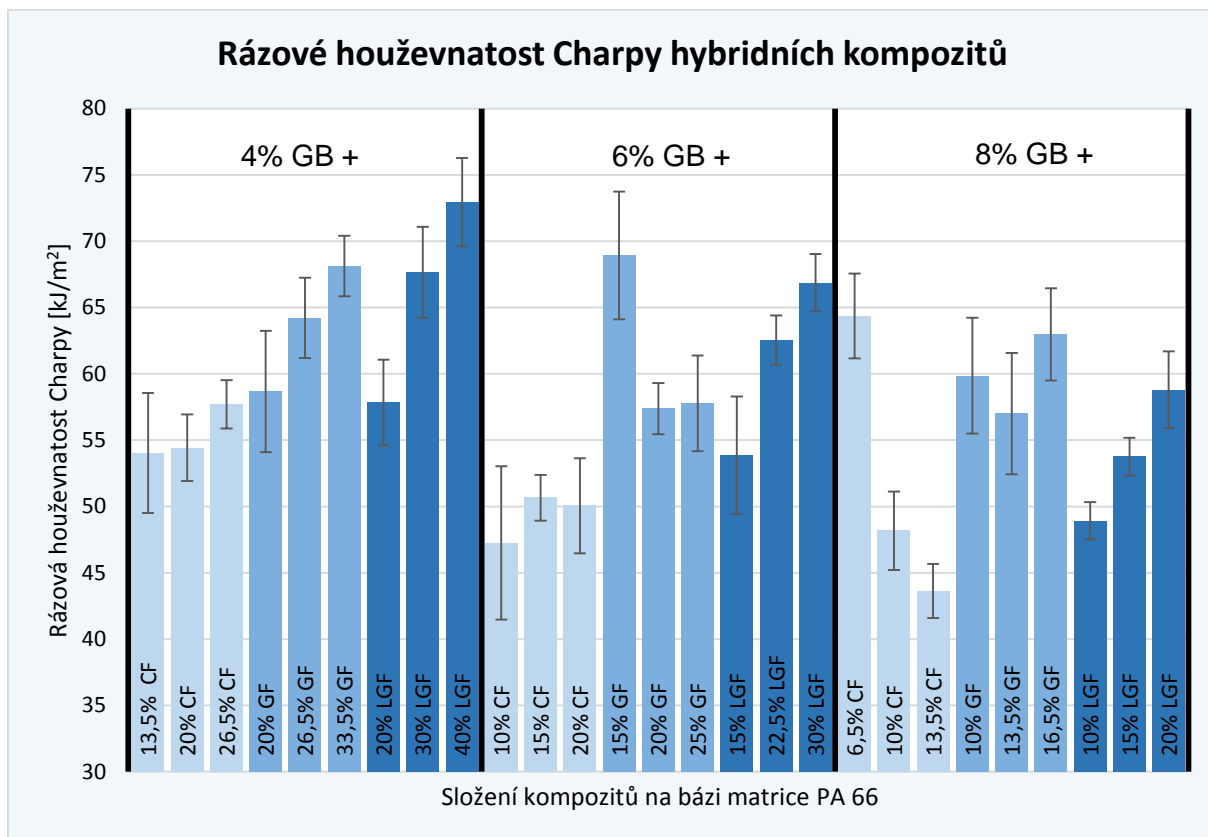
$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \times 10^3 \quad (2)$$

kde je:

- $a_{cU}$  rázová houževnatost Charpy [ $\text{kJ/m}^2$ ],
- $E_c$  korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa [J],
- $h$  tloušťka zkušebního tělesa [mm],
- $b$  šířka zkušebního tělesa [mm].

**Tab. 13** Hodnoty rázové houževnatosti hybridních kompozitů v závislosti na druhu a množství výztuže

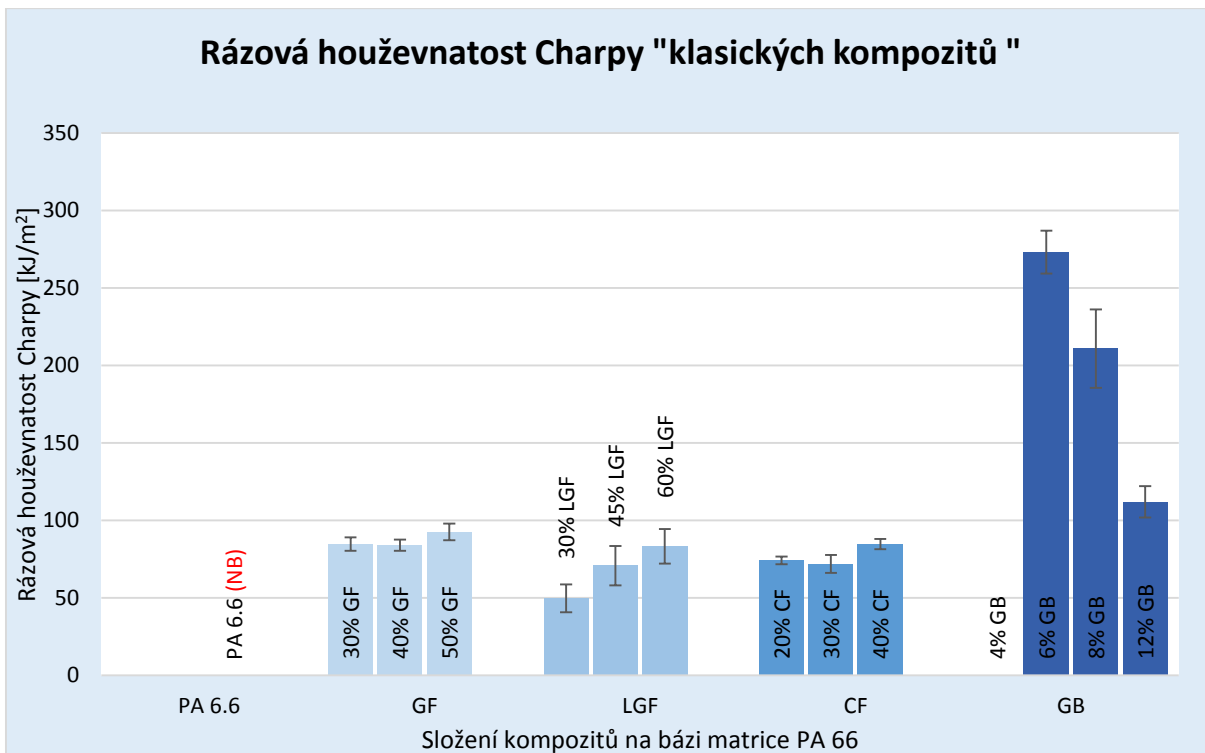
Výztuž	$a_{cU}$ [ $\text{kJ/m}^2$ ]	Výztuž	$a_{cU}$ [ $\text{kJ/m}^2$ ]
4%GB + 13,5%CF	54,0 ± 4,5	6%GB + 20%GF	57,4 ± 1,9
4%GB + 20%CF	54,4 ± 2,5	6%GB + 22,5%LGF	62,5 ± 1,9
4%GB + 20%GF	58,7 ± 4,6	6%GB + 25%GF	57,8 ± 3,6
4%GB + 20%LGF	57,9 ± 3,2	6%GB + 30%LGF	66,9 ± 2,2
4%GB + 26,5%CF	57,7 ± 1,8	8%GB + 6,5%CF	64,4 ± 3,2
4%GB + 26,6%GF	64,2 ± 3,0	8%GB + 10%CF	48,2 ± 3,0
4%GB + 30%LGF	67,7 ± 3,4	8%GB + 10%GF	59,9 ± 4,4
4%GB + 33,5%GF	68,1 ± 2,3	8%GB + 10%LGF	48,9 ± 1,4
4%GB + 40%LGF	73,0 ± 3,3	8%GB + 13,5%CF	43,6 ± 2,0
6%GB + 10%CF	47,2 ± 5,8	8%GB + 13,5%GF	57,0 ± 4,6
6%GB + 15%CF	50,7 ± 1,7	8%GB + 15%LGF	53,8 ± 1,4
6%GB + 15%GF	68,9 ± 4,8	8%GB + 16,5%GF	63,0 ± 3,5
6%GB + 15%LGF	53,9 ± 4,4	8%GB + 20%LGF	58,8 ± 2,9
6%GB + 20%CF	50,1 ± 3,6		



**Obr. 34** Vliv přidávaných vyztužujících fází na rázovou houževnatost Charpy hybridních kompozitů

**Tab. 14** Hodnoty rázové houževnatosti „klasických kompozitů“ v závislosti na druhu a množství výtže

Výtěž	Matrice	$a_{cu}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	typ přeražení
PA 66	Technyl A 218 black 21N	NB	NB
PA 66	30% GF + Technyl A218 21N	84,7 ± 4,3	C
	40% GF + Technyl A218 V50 21N	84,0 ± 3,6	C
	50% GF + Technyl A218 V50 21N	92,5 ± 5,3	C
PA 66	30% LGF + Celstran GF60-02	49,6 ± 9,0	C
	45% LGF + Technyl A218 21N	70,8 ± 12,7	C
	60% LGF + Celstran GF60-02	83,2 ± 11,2	C
PA 66	20% CF + Luvocom 1/CF/40	74,2 ± 2,4	C
	30% CF + Technyl A218 21N	71,8 ± 5,8	C
	40% CF + Luvocom 1/CF/40	84,7 ± 3,2	C
PA 66	4% GB	NB	NB
	6% GB	273,2 ± 13,9	NB
	8% GB	211,0 ± 25,3	NB
	12% GB	112,0 ± 10,1	NB



**Obr. 35** Vliv přidanych vyztužujících fází na rázovou houževnatost Charpy „klasických kompozitů“

### 3.5 Stanovení tvrdosti Shore D

Pro zjišťování hodnoty tvrdosti byla zvolena metoda Shore D, protože je vhodná pro materiály tvrdší povahy v porovnání s metodou Shore A. Tvrdost Shore D byla testována pomocí tvrdoměru Shore (viz obr 36). Postup měření byl prováděn dle normy ČSN EN ISO 868 na víceúčelových zkušebních tělesech pomocí deseti vpichů, které byly umístovány minimálně 9 mm od okraje a minimálně ve vzdálenost 6 mm od sebe [67]. Výška zkušebního tělesa odpovídala požadované tloušťce 4 mm.

Zkušební těleso bylo položeno na rovnou a tvrdou desku tvrdoměru. Po umístění byla opěrná patka tvrdoměru přitlačena kolmo na povrch vzorku a vyčnívající hrot vtlačen do zkušebního tělesa. Po uplynutí 15 s došlo k odečtu hodnoty tvrdosti Shore D, která je závislá na modulu pružnosti a viskoelasticitě daného materiálu. Všechny naměřené průměrné hodnoty spolu se směrodatnými odchylkami jsou zobrazeny v tab. 15. Pro lepší porovnání vlivu přidanych vyztuží jsou výsledky zobrazeny také graficky na obr. 37, ve kterém jsou průměrné hodnoty tvrdosti všech kombinací. Jako v předešlých případech i zde jsou přiloženy převzaté

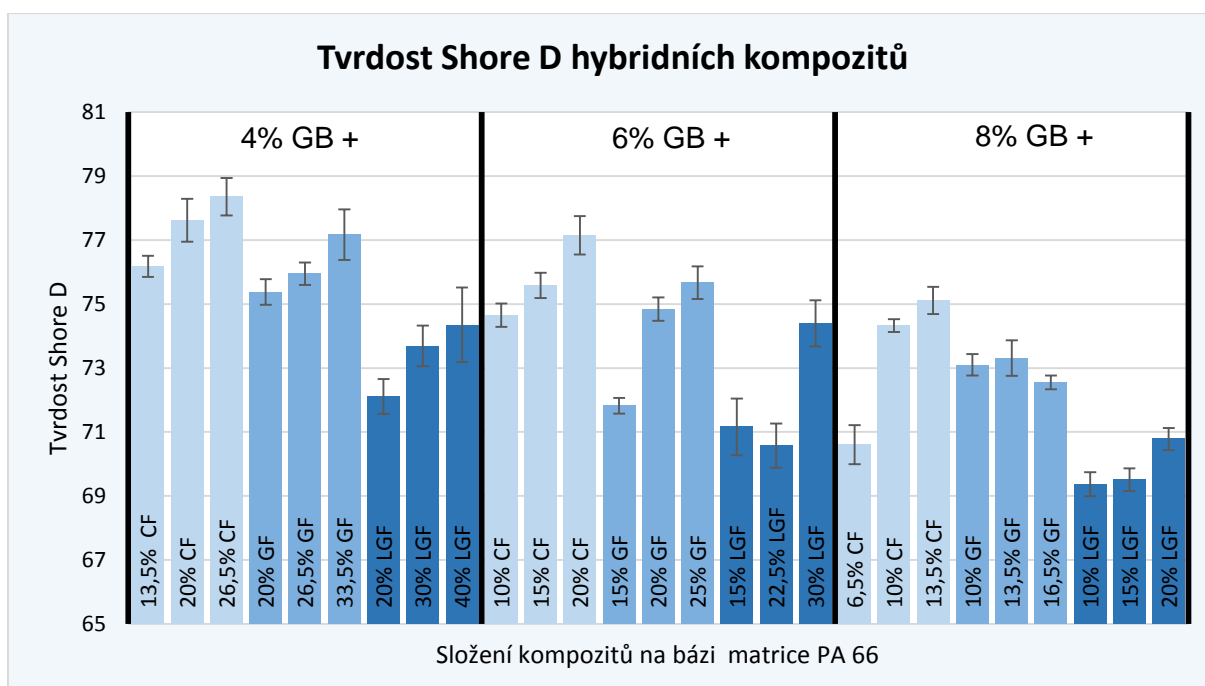


**Obr. 36** Tvrdoměr Shore

hodnoty tvrdosti u „klasických kompozitů“, které byly použity v diskusi dosažených výsledků v souvislosti s hybridními kompozity (viz tab. 16 a obr. 38).

**Tab. 15** Hodnoty tvrdosti Shore D hybridních kompozitů v závislosti na druhu a množství výztuže

Výztuž	Tvrdość Shore D	Výztuž	Tvrdość Shore D
4%GB + 13,5%CF	76,2 ± 0,3	6%GB + 20%GF	74,8 ± 0,4
4%GB + 20%CF	77,6 ± 0,7	6%GB + 22,5%LGF	70,6 ± 0,7
4%GB + 20%GF	75,4 ± 0,4	6%GB + 25%GF	75,7 ± 0,5
4%GB + 20%LGF	72,1 ± 0,5	6%GB + 30%LGF	74,4 ± 0,7
4%GB + 26,5%CF	78,4 ± 0,6	8%GB + 6,5%CF	70,6 ± 0,6
4%GB + 26,5%GF	76,0 ± 0,4	8%GB + 10%CF	74,3 ± 0,2
4%GB + 30%LGF	73,7 ± 0,6	8%GB + 10%GF	73,1 ± 0,3
4%GB + 33,5%GF	77,2 ± 0,8	8%GB + 10%LGF	69,4 ± 0,4
4%GB + 40%LGF	74,4 ± 1,2	8%GB + 13,5%CF	75,1 ± 0,4
6%GB + 10%CF	74,7 ± 0,4	8%GB + 13,5%GF	73,3 ± 0,6
6%GB + 15%CF	75,6 ± 0,4	8%GB + 15%LGF	69,5 ± 0,4
6%GB + 15%GF	71,8 ± 0,3	8%GB + 16,5%GF	72,6 ± 0,2
6%GB + 15%LGF	71,2 ± 0,9	8%GB + 20%LGF	70,8 ± 0,4
6%GB + 20%CF	77,2 ± 0,6		

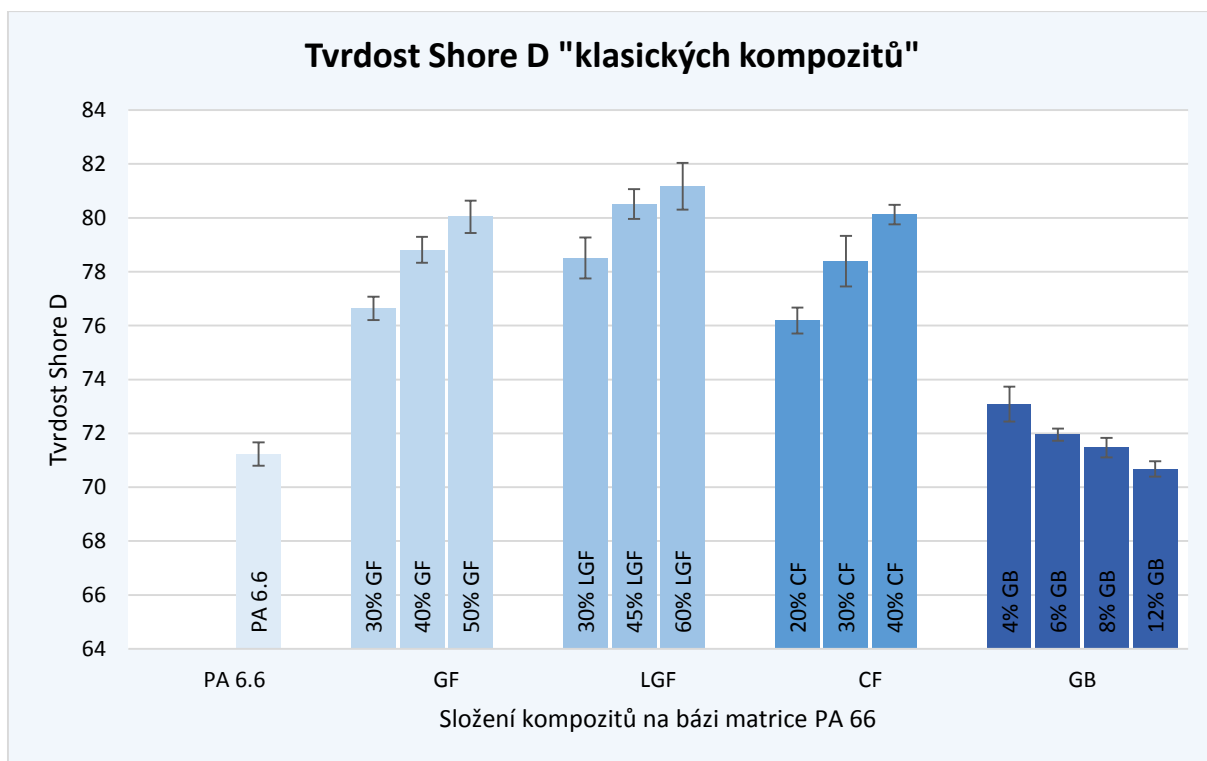


**Obr. 37** Vliv přidávaných vyztužujících fází na tvrdość Shore D hybridních kompozitů



**Tab. 16** Hodnoty tvrdosti „klasických kompozitů“ v závislosti na druhu a množství výztuže

Výztuž	Marice	Tvrdość Shore D	
PA 66	Technyl A 218 black 21N	71,2 ± 0,4	
PA 66	30% GF	76,6 ± 0,4	
	40% GF	78,8 ± 0,5	
	50% GF	80,0 ± 0,6	
PA 66	30% LGF	78,5 ± 0,8	
	45% LGF	80,5 ± 0,6	
	60% LGF	81,2 ± 0,9	
PA 66	20% CF	76,2 ± 0,5	
	30% CF	78,4 ± 0,9	
	40% CF	80,1 ± 0,4	
PA 66	Technyl A 218 black 21N	4% GB	73,1 ± 0,6
		6% GB	72,0 ± 0,2
		8% GB	71,5 ± 0,4
		12% GB	70,7 ± 0,3



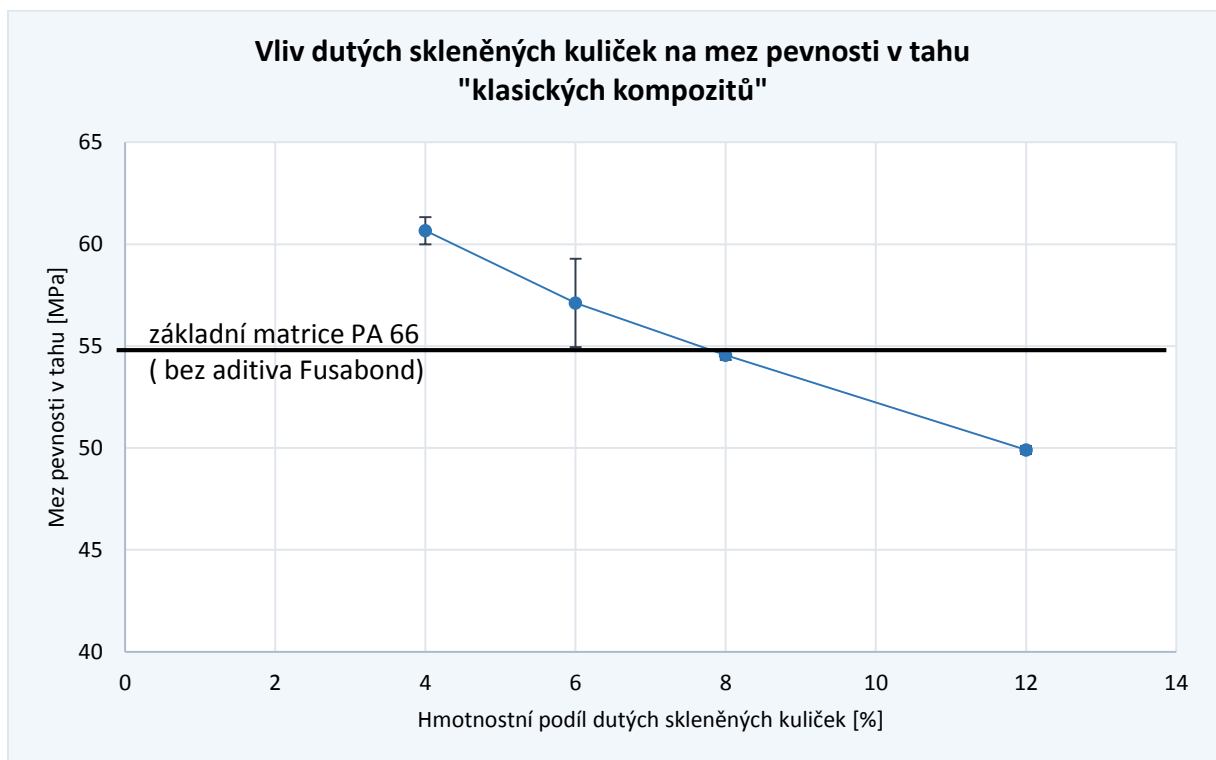
**Obr. 38** Vliv přidaných vyztužujících fází na tvrdość Shore D „klasických kompozitů“

## 4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

### 4.1 Zhodnocení tahových vlastností hybridních kompozitů

#### 4.1.1 Mez pevnosti v tahu

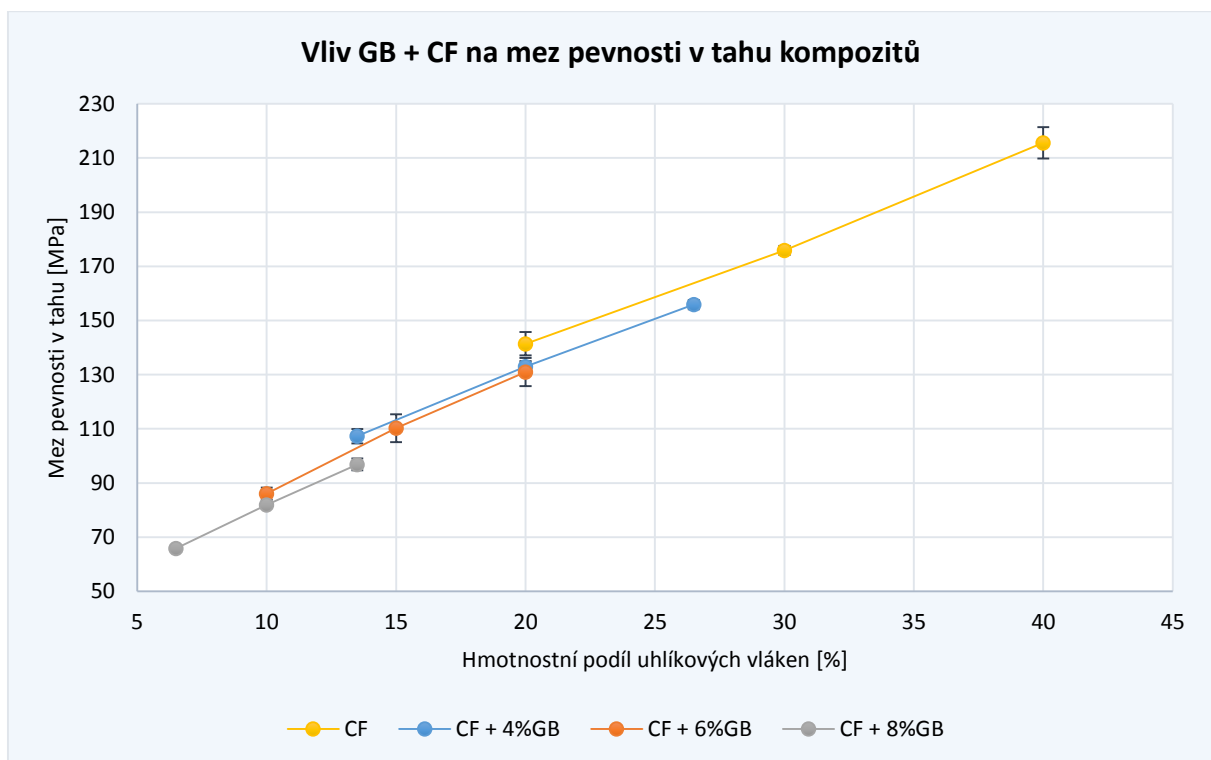
Před hodnocením meze pevnosti v tahu ( $\sigma_m$ ) hybridních kompozitů je na obr. 39 znázorněn nejprve vliv samotných dutých skleněných kuliček (GB) v polymerní matrici PA 66. Z obr. 39 je zřejmé, že s vyšším množstvím dutých skleněných kuliček výrazně klesá mez pevnosti kompozitu. Nízké procento hmotnostního podílu dutých skleněných kuliček v polymerní matrici mez pevnosti v tahu mírně zvyšuje (cca o 4 ÷ 10 %), což je způsobeno pravděpodobně vlivem přidání adhezního činidla Fusabond. Při použití více jak 8 % GB dochází oproti čisté matrici ke snížení meze pevnosti kompozitu. Při použití 12 % GB dojde ke snížení meze pevnosti téměř o 10 %.



**Obr. 39** Závislost meze pevnosti v tahu na podílu dutých skleněných kuliček u kompozitů na bázi PA 66

Na obr. 40 ÷ obr. 42 je znázorněn vliv množství dutých skleněných kuliček na mez pevnosti v tahu kompozitů v kombinaci s různými druhy vlákněné výztuže. Se zvyšujícím se množstvím dutých skleněných kuliček dochází ke snížení meze pevnosti v tahu. Hodnoty meze pevnosti hybridních kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny (CF) se snižují i při nízkém množství dutých skleněných kuliček (GB). „Klasické kompozity“ s uhlíkovými vlákny vykazují

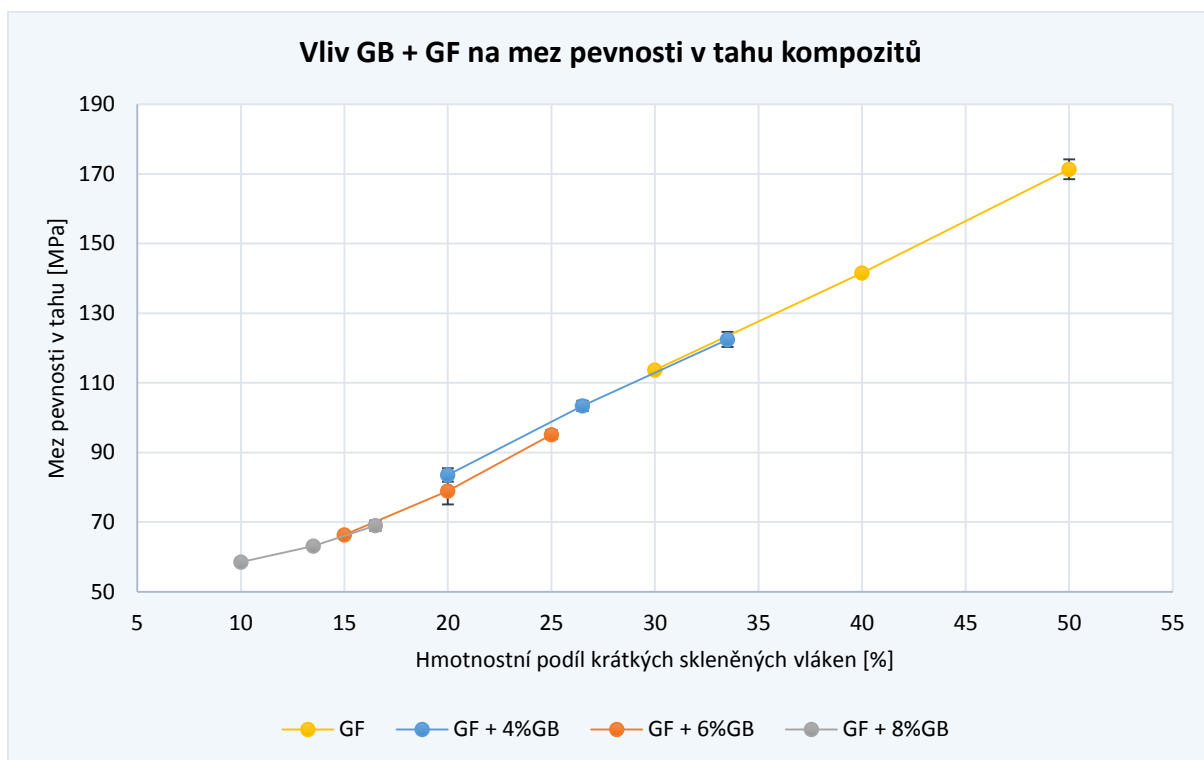
nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu. Například kompozit s 6 % GB a 20 % CF vykazuje snížení pevnosti o téměř 8 % oproti „klasickému kompozitu“ vyztuženého pouze 20 % CF (mez pevnosti klesá z hodnoty 142 MPa na 131 MPa, viz obr. 40). Nejnižší nárůst meze pevnosti v porovnání se základní polymerní matricí PA 66 vykazuje kompozit s 8 % GB a 6,5 % CF, jehož hodnota meze pevnosti vzrostla pouze o 20 %. Naopak nejvyšší nárůst meze pevnosti z hybridních kompozitů dosahuje kompozit 4 % GB a 26,5 % CF, jehož hodnota vzrostla o 183 %. Lze tedy říci, že uhlíková vlákna mez pevnosti kompozitního materiálu zvyšují, zatímco skleněné duté kuličky jí snižují. Kombinací uhlíkových vláken a skleněných dutých kuliček dochází k poklesu meze pevnosti oproti kompozitům vyztužených pouze uhlíkovými vlákny (klasické kompozity). Důležitým porovnáním však bude tzv. měrná pevnost, která při větším hmotnostním zastoupení dutých skleněných kuliček v hybridních kompozitech (větším množství než v rámci provedeného experimentálního měření) může být příznivější než u kompozitů s uhlíkovými vlákny bez skleněných dutých kuliček (s ohledem na pokles hustoty kompozitů obsahující skleněné duté kuličky, viz příloha 1).



**Obr. 40** Závislost meze pevnosti v tahu na množství dutých skleněných kuliček a uhlíkových vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Při použití kombinace krátkých skleněných vláken (GF) a dutých skleněných kuliček (GB) není rozdíl v mezi pevnosti kompozitu tak znatelný, jako tomu bylo u hybridních kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny (viz obr. 41). Hodnoty meze pevnosti „klasických kompozitů“ vyztužených pouze krátkými skleněnými vlákny jsou podobné hodnotám

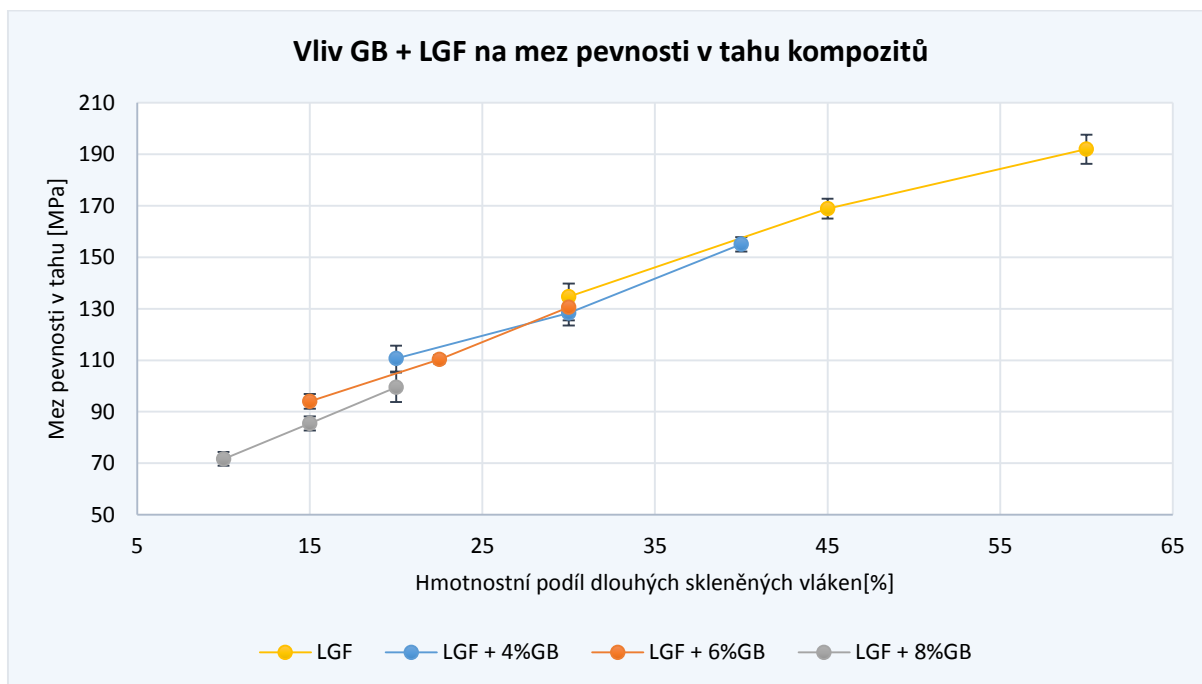
hybridních kompozitů s krátkými skleněnými vlákny a 4 % dutých skleněných kuliček. S obsahem 4 % GB nedochází tedy k výraznému snížení meze pevnosti kompozitu (výhodou však bude vlivem GB pokles hustoty kompozitního systému). Jediný pokles meze pevnosti vlivem dutých skleněných kuliček zaznamenávají hybridní kompozity vyztužené krátkými skleněnými vlákny a 8 % nebo 6 % dutých skleněných kuliček, je však třeba zohlednit větší hodnotu velikosti směrodatné odchylky měřených hodnot meze pevnosti v ohybu.



**Obr. 41** Závislost meze pevnosti v tahu na množství dutých skleněných kuliček a krátkých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

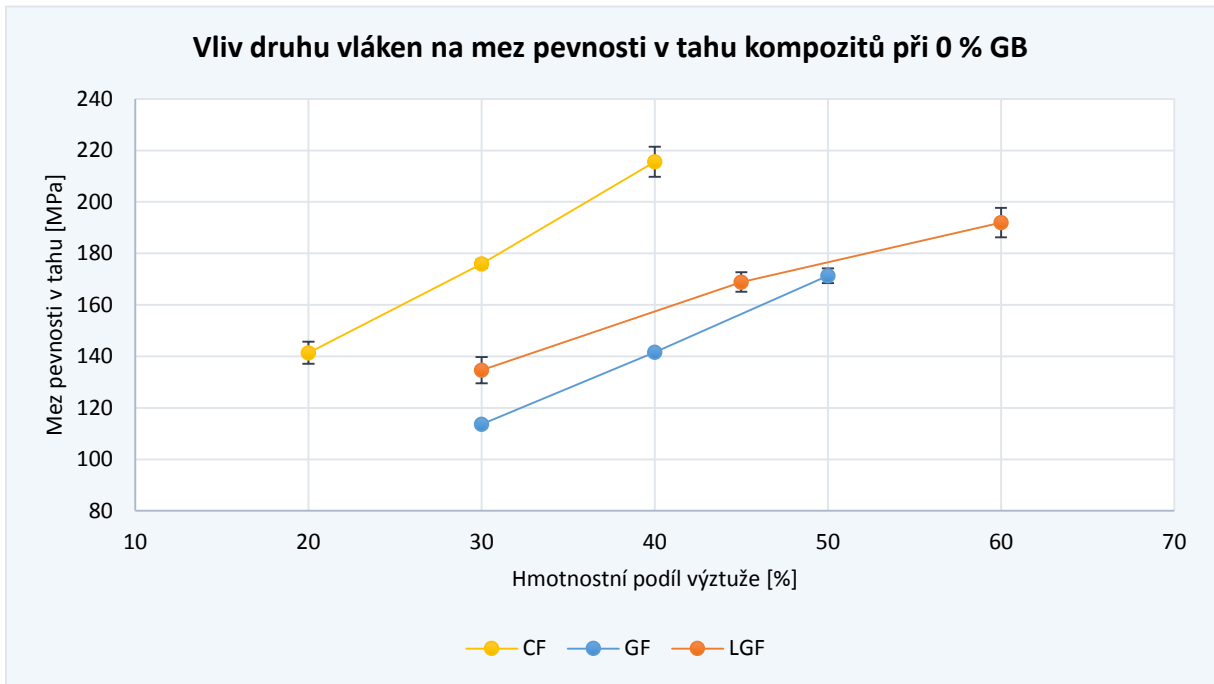
U hybridních kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) je rozdíl výraznější než u hybridních kompozitů s krátkými skleněnými vlákny (GF). Vliv dutých skleněných kuliček (GB) potvrzuje u těchto kompozitů snižování meze pevnosti téměř ve všech případech. Například kompozit s 8 % GB a 15 % LGF vykazuje snížení meze pevnosti o 9 % oproti kompozitu s 6 % GB a 15 % LGF (viz obr. 42). Ostatní kompozity vykazují podobné průběhy. Výjimku tvoří kompozit s 6 % GB a 30 % LGF, jehož hodnota meze pevnosti je vyšší než mez pevnosti kompozitu s 4 % GB a 30 % LGF. Rozdíl se dá vysvětlit opět směrodatnými odchylkami, které vznikly zprůměrováním naměřených hodnot při experimentu a mohly mít vliv na průběh křivky meze pevnosti v tahu v závislosti na množství a typu výztuže. Stejně jako u kompozitů s uhlíkovými vlákny (viz obr. 40) platí tedy, že kompozity s LGF vykazují s vyšším množstvím dutých skleněných kuliček nižší meze pevnosti v tahu. I zde však bude rozhodujícím faktorem tzv. měrná pevnost, která může být při větším hmotnostním zastoupení dutých skleněných

kuliček příznivější u hybridních kompozitů než u „klasických kompozitů“ bez dutých skleněných kuliček.

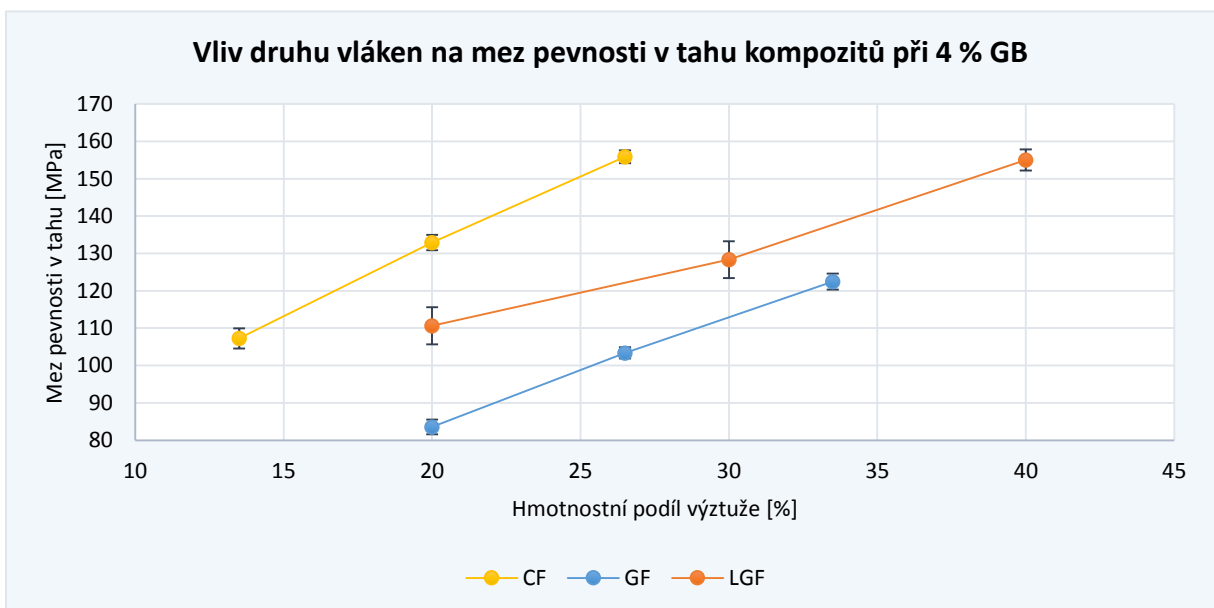


**Obr. 42** Závislost meze pevnosti v tahu na množství dutých skleněných kuliček a dlouhých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Na obr. 43 je znázorněna závislost meze pevnosti v tahu u „klasických kompozitů“ vyztužených třemi druhy vláknenné výztuže. Přidáním všech tří druhů zkoumaných vláken dochází ke zvýšení meze pevnosti PA matrice. Nejvyšších hodnot meze pevnosti „klasických kompozitů“ se dosahuje při použití uhlíkových vláken (CF). Kompozity s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) dosahují nižších hodnot meze pevnosti ( $\sigma_m$ ) a nejmenší hodnoty vykazují kompozity s krátkými skleněnými vlákny (GF). Oproti čisté matrici ( $\sigma_m = 55$  MPa) se při použití kompozitu vyztuženého 30 % uhlíkových vláken dosáhlo zvýšení meze pevnosti téměř o 220 % ( $\sigma_m = 175,9$  MPa), při vyztužení 30 % LGF o 145 % a při vyztužení 30 % GF o 107 %. Je tedy zřejmé, že kompozity s uhlíkovými vlákny (CF) vykazují výrazně lepší hodnoty  $\sigma_m$ . Při porovnání kompozitů vyztužených 30 % GF nebo 30 % LGF, je zřejmé, že u dlouhovláknových kompozitů (LGF) bylo dosaženo zvýšení meze pevnosti v tahu téměř o celých 40 %. Hlavní příčinou může být menší množství tzv. napěťových špiček. Vnější zatížení je na vlákna přenášeno prostřednictvím matrice a na koncích vláken se koncentruje napětí. Větší množství napěťových špiček je tak dosahováno u krátkovláknových kompozitů a ty mají za následek nižší hodnoty meze pevnosti kompozitu.



**Obr. 44** Závislost meze pevnosti v tahu na množství a typu vláken u „klasických kompozitů“ na bázi matrice PA 66

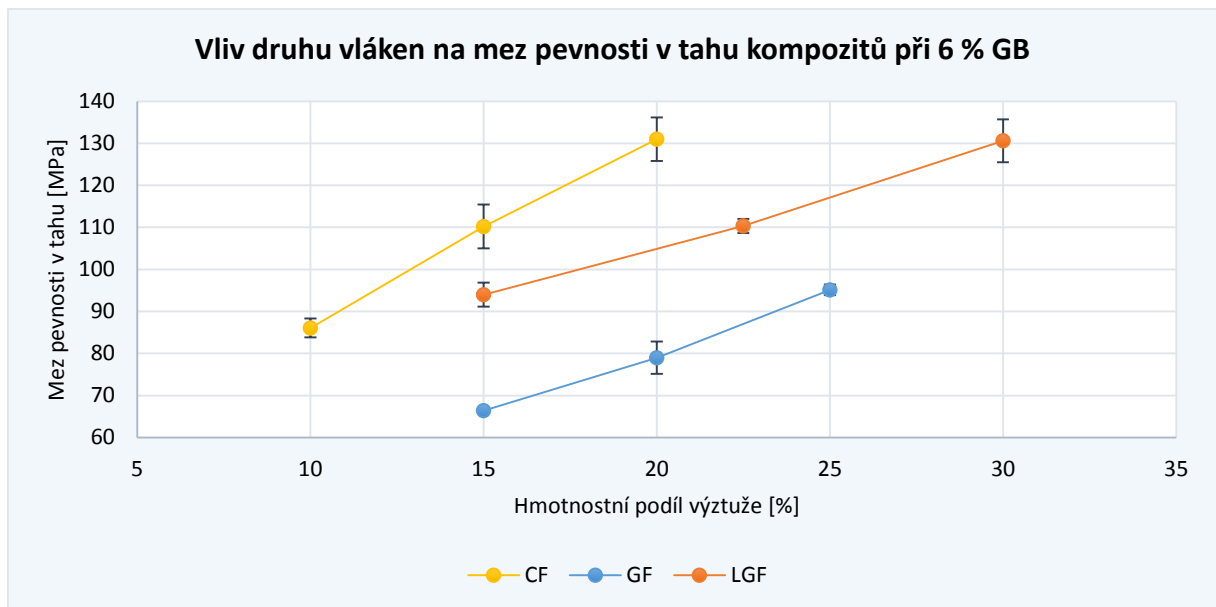


**Obr. 43** Závislost meze pevnosti v tahu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66

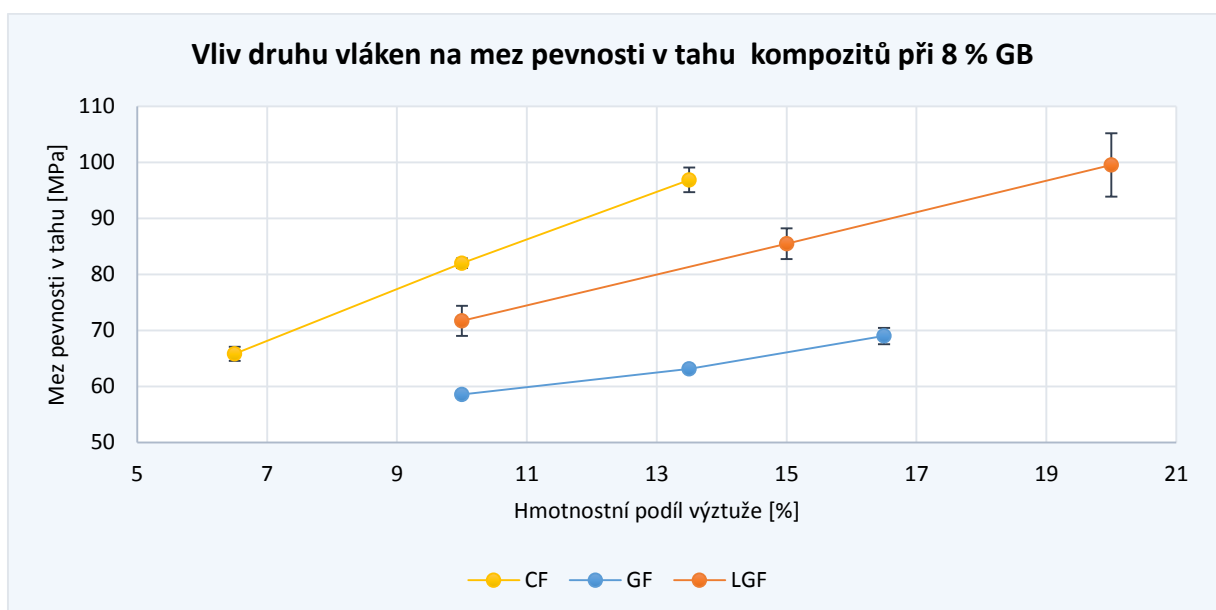
Na obr. 44 ÷ obr. 46 jsou znázorněny meze pevnosti v tahu hybridních kompozitů vyztužených třemi druhy vláknenných výztuží a 4 %, 6 % nebo 8 % dutých skleněných kuliček. Podobně jako u „klasických kompozitů“ vykazují hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny (CF) nejlepších hodnot meze pevnosti ( $\sigma_m$ ). Hodnoty  $\sigma_m$  hybridních kompozitů jsou o něco menší než u „klasických kompozitů“, což bylo ovlivněno přidáním dutých skleněných kuliček, jejichž negativní vliv ve vztahu k hodnotám  $\sigma_m$  byl diskutován na obr. 39. Oproti čistému PA 66 dochází při použití 4 % GB a 20 % CF k nárůstu meze pevnosti kompozitu o 141 %, při 4 % GB a 20 % LGF k nárůstu o 100 % a při použití 4 % GB a 20 % GF k nárůstu o 52 %. Z obr. 44 je

také nasnadě porovnání kompozitů s uhlíkovými vlákny a dlouhými skleněnými vlákny při hodnotě meze pevnosti 155 MPa. Hybridní kompozit se 4 % GB a 40 % LGF dosahuje stejných hodnot meze pevnosti jako kompozit se 4 % GB avšak pouze s 26,5 % CF (tedy o 14 % méně vyztužujících vláken).

Na obr. 45 a obr. 46 jsou uvedeny obdobné závislosti hybridních kompozitů s 6 % nebo 8 % dutých skleněných kuliček. Přehled procentuálního zvýšení hodnot meze pevnosti v tahu u všech zkoumaných kombinací hybridních kompozitů (vzhledem k čisté polymerní matici PA 66) je uveden v příloze 4 na str. P18 ÷ P19.



**Obr. 45** Závislost meze pevnosti v tahu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 6 % dutých skleněných kuliček

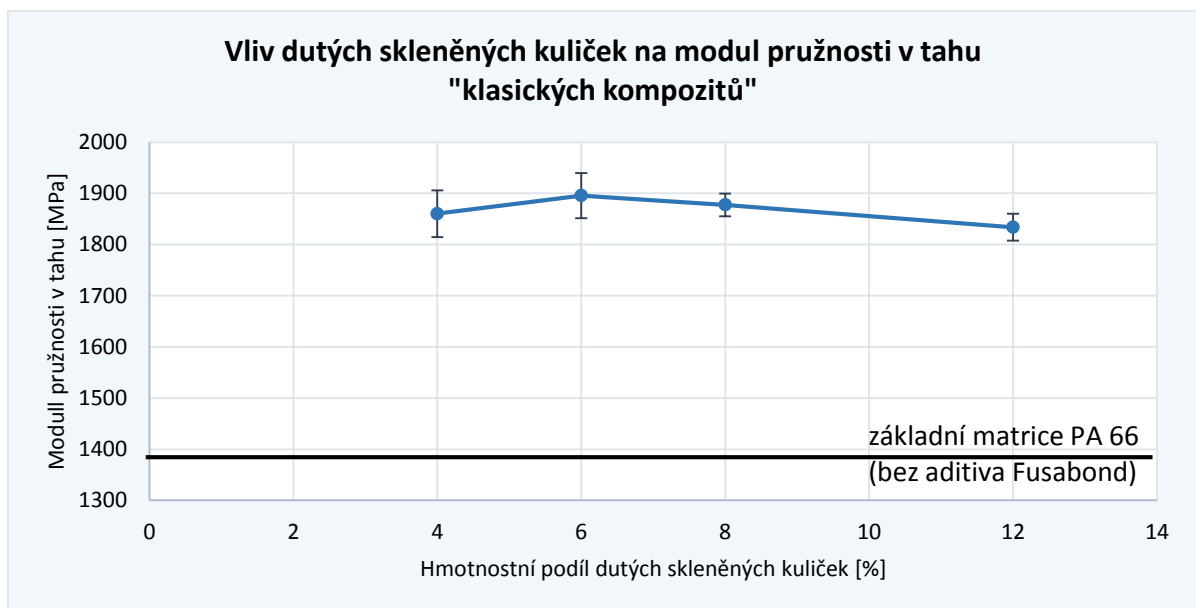


**Obr. 46** Závislost meze pevnosti v tahu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 8 % dutých skleněných kuliček



#### 4.1.2 Modul pružnosti v tahu

Další zjišťovanou tahovou charakteristikou byl modul pružnosti v tahu ( $E_t$ ). Opět je nejdříve znázorněn vliv dutých skleněných kuliček (GB) na modul pružnosti v tahu kompozitu. Je patrné, že duté skleněné kuličky mají pozitivní vliv na hodnoty  $E_t$ . Přidáním 4 % dutých skleněných kuliček došlo ke zvýšení  $E_t$  kompozitu o 35 % oproti čisté matici PA 66, která však neobsahuje adhezní činidlo Fusabond (viz obr. 47). Zvyšující se podíl dutých skleněných kuliček v rozsahu 4 % až 12 % nemělo na hodnotu  $E_t$  téměř žádný vliv (vzhledem k rozptylu naměřených hodnot, vyjádřených směrodatnou odchylkou).

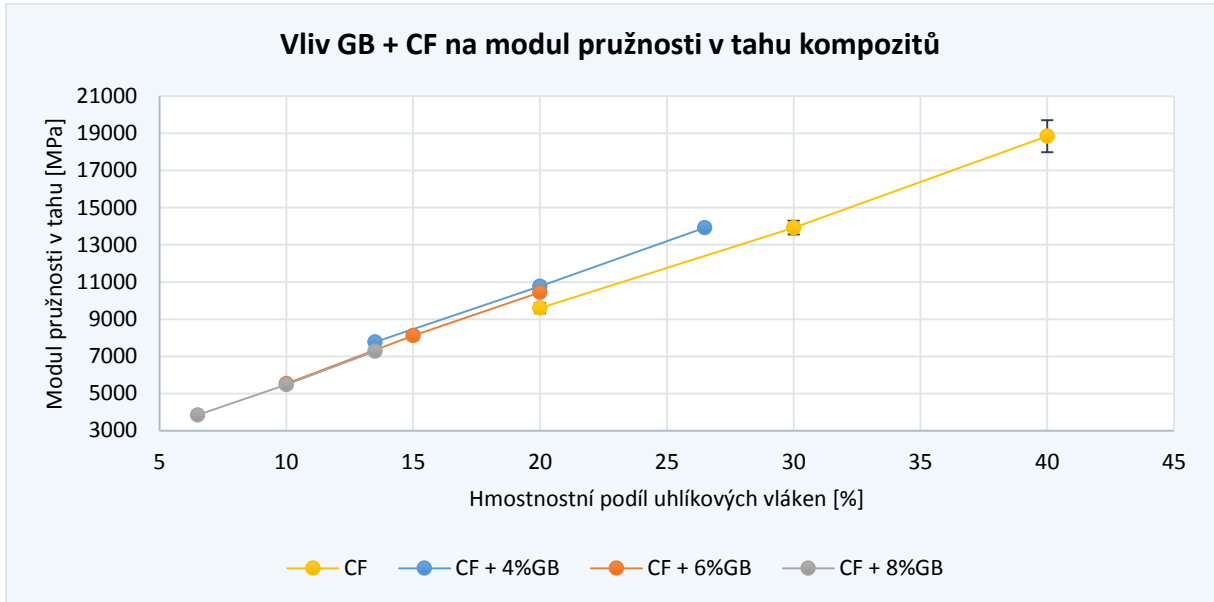


**Obr. 47** Závislost modulu pružnosti v tahu na podílu dutých skleněných kuliček u kompozitů na bázi PA 66

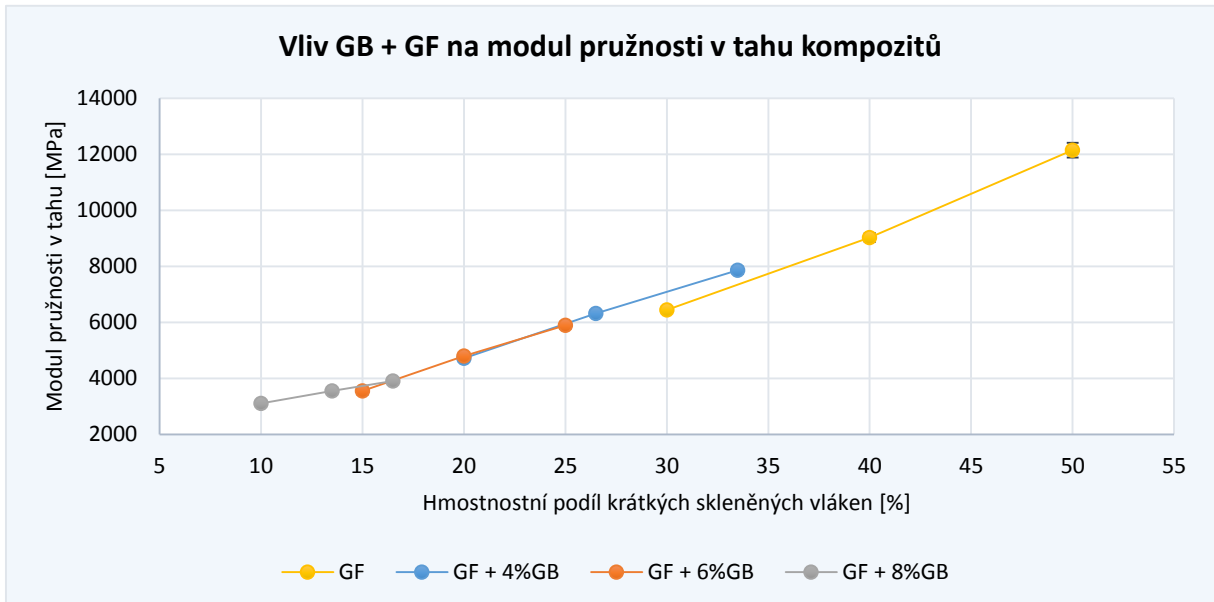
Na obr. 48 je znázorněn vliv dutých skleněných kuliček na kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny. „Klasické kompozity“ (bez skleněných dutých kuliček) vykazují nižší hodnoty  $E_t$  než hybridní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny (CF) a dutými skleněnými kuličkami (GB). Ve vzájemném porovnání hybridních kompozitů, lze vidět malý rozdíl v hodnotách  $E_t$  s rostoucím množstvím dutých skleněných kuliček. Jak bylo znázorněno na obr. 47, tak množství dutých skleněných kuliček v hybridních kompozitech zvyšuje  $E_t$ , ale vyšší množství dutých skleněných kuliček ve sledovaném rozsahu nemá na nárůst  $E_t$  výrazný vliv (viz obr. 48).

Kompozit se 4 % GB a 26,5 % CF ( $E_t = 13916$  MPa) vykazuje podobný modul pružnosti jako „klasický kompozit“ vyztužený pouze 30 % uhlíkových vláken ( $E_t = 13928$  MPa). Přidáním 4 % dutých skleněných kuliček a zároveň snížením množství uhlíkových vláken nedošlo ke snížení modulu pružnosti (výhodou bude rovněž snížení hustoty kompozitního systému vlivem dutých skleněných kuliček a snížením hmotnostního podílu vlákněné výztuže, které se odrazí také v příznivějších tokových vlastnostech taveniny při zpracování). Dalším příkladem může

být přidání 4 % dutých skleněných kuliček do kompozitu vyztuženého 20 % uhlíkových vláken (CF), u kterého se dosáhlo zvýšení hodnoty modulu pružnosti o 12 % oproti „klasickému kompozitu“ vyztuženého pouze 20 % uhlíkových vláken. Co se týče nárůstu  $E_t$  v porovnání s PA 66, tak modul pružnosti v tahu hybridních kompozitů dosahuje mnohem vyšších hodnot. Například u kompozitu s 8 % GB a 6,5 % CF dochází k nárůstu  $E_t$  o 180 %, u kompozitu s 6 % GB a 26,5 % CF k nárůstu o 911 %.



**Obr. 48** Závislost modulu pružnosti v tahu na množství dutých skleněných kuliček a uhlíkových vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

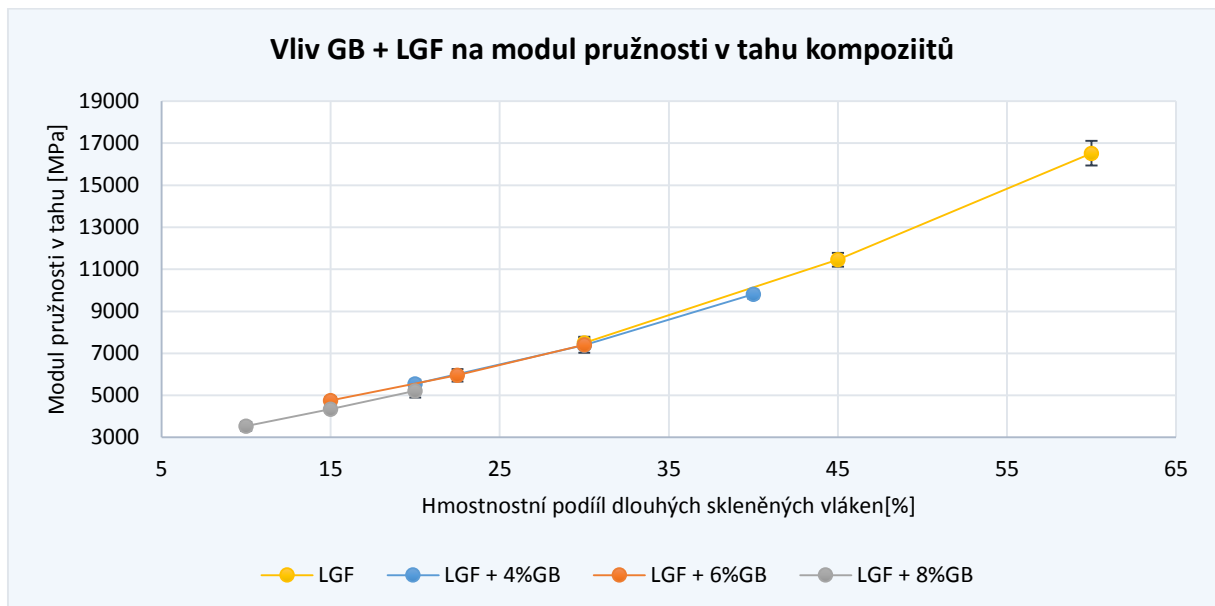


**Obr. 49** Závislost modulu pružnosti v tahu na množství dutých skleněných kuliček a krátkých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Kompozity vyztužené krátkými skleněnými vlákny (GF) a dutými skleněnými kuličkami (GB) dosahují také vyšších hodnot  $E_t$  než „klasické kompozity“ vyztužené pouze krátkými skleněnými vlákny (viz obr. 49). V případě hybridních kompozitů (GB + GF) platí, že zvýšením

množství dutých skleněných kuliček nedochází téměř k žádnému zvýšení modulu pružnosti v tahu hybridního kompozitu.

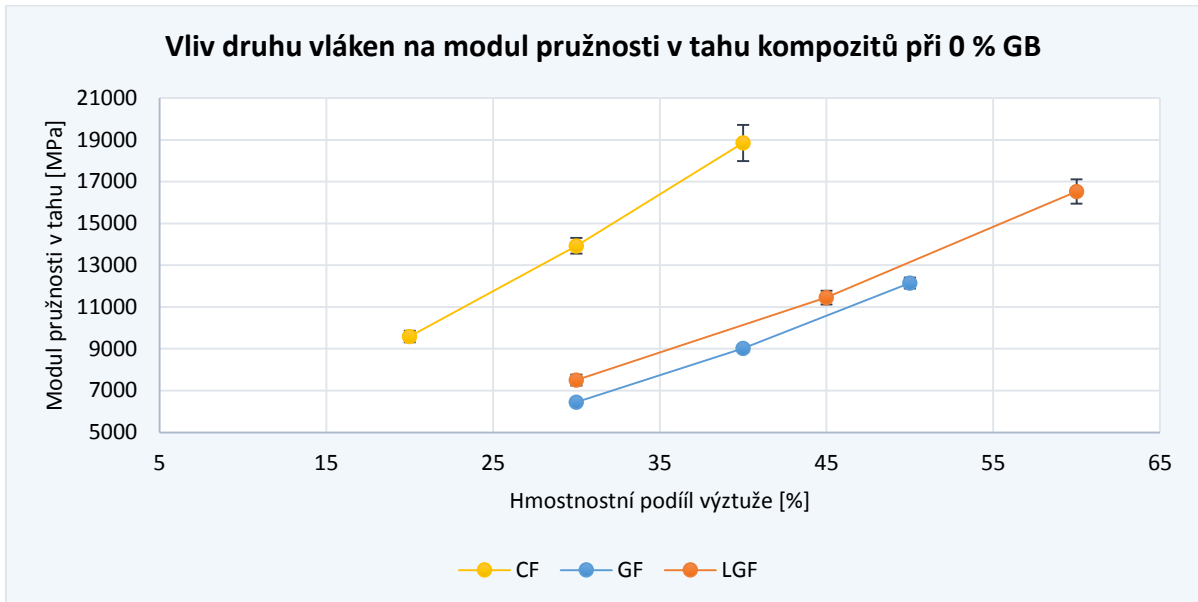
Na obr. 50 není vliv dutých skleněných kuliček (GB) na hodnoty modulu pružnosti hybridních kompozitů vyztužených dlouhými skleněnými vlákny (LGF) zřetelný. „Klasické kompozity“ vyztužené pouze dlouhými skleněnými vlákny dosahují podobných hodnot  $E_t$  jako hybridní kompozity vyztužené dlouhými skleněnými vlákny a dutými skleněnými kuličkami. Například  $E_t$  „klasického kompozitu“ s 30 % dlouhých skleněných vláken dosahuje hodnoty  $E_t = 7504$  MPa, hybridní kompozit s 4 % GB a 30 % LGF hodnoty  $E_t = 7398$  MPa a hybridní kompozit s 6 % GB a 30 % LGF hodnoty  $E_t = 7411$  MPa. Oproti předchozím případům (viz obr. 48 a obr. 49) tak nedochází u hybridních kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) přidáním dutých skleněných kuliček k výrazné změně modulu pružnosti v tahu v porovnání s „klasickými kompozity“. Avšak vlivem vyššího množství dutých skleněných kuliček v hybridních kompozitech (zejména při vyšším množství) lze předpokládat, že bude dosaženo vyšší měrné tuhosti než u „klasických kompozitů“.



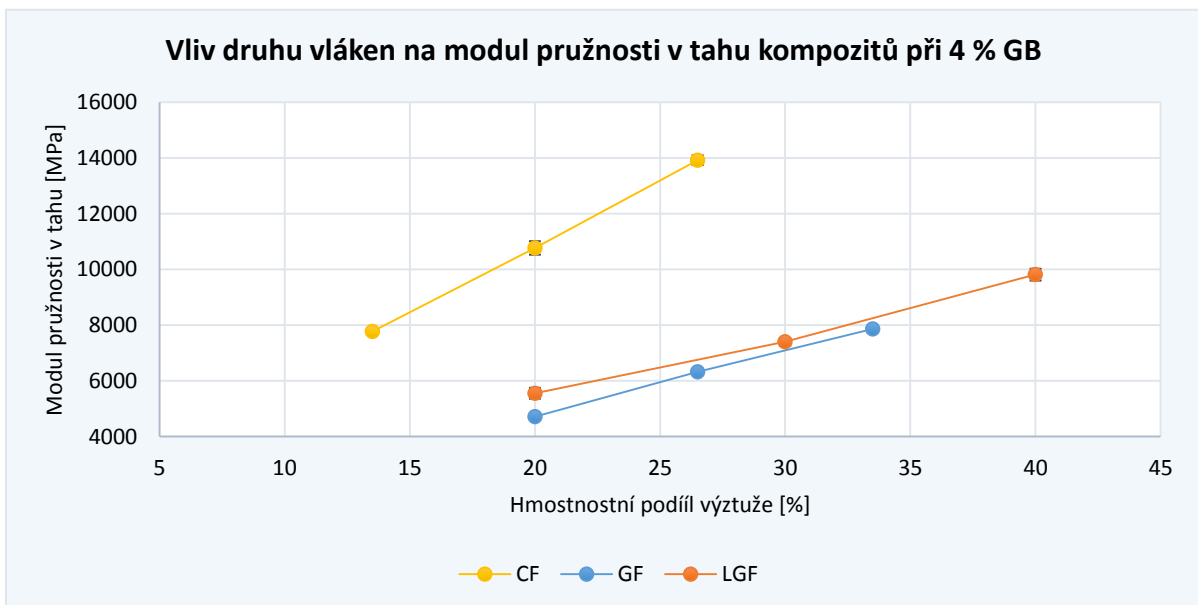
**Obr. 50** Závislost modulu pružnosti v tahu na množství dutých skleněných kuliček a dlouhých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Na obr. 51 jsou znázorněny změny modulu pružnosti „klasických kompozitů“ vyztužených třemi druhy vláken. Přidáním všech tří druhů vláken do PA matrice došlo ke zvýšení  $E_t$  kompozitu (modul pružnosti v tahu PA 66 = 1376 MPa). Nejvyšších hodnot  $E_t$  dosahují kompozity s uhlíkovými vlákny (CF). Například přidáním 20 % uhlíkových vláken (CF) do matrice PA 66 se hodnota  $E_t$  zvýší o téměř 600 %, přidáním 30 % CF dochází ke zvýšení o 912 % ( $E_t = 13928$  MPa). Kompozity s dlouhými a krátkými skleněnými vlákny vykazují nižší hodnoty  $E_t$  oproti kompozitům s uhlíkovými vlákny (CF). Při vzájemném porovnání „klasických kompozitů“ s LGF a GF vykazují kompozity s dlouhými skleněnými vlákny vyššího modulu pružnosti v tahu. Oproti PA 66 dosáhly kompozity s 30 % dlouhých skleněných vláken zvýšení

o 445 %, respektive o 369 % při 30 % krátkých skleněných vláken. Hlavní příčinou je pravděpodobně opět přítomnost vyššího množství napěťových špiček u kompozitů vyztužených krátkými skleněnými vlákny, mající za následek snížení modulu pružnosti v tahu kompozitu.



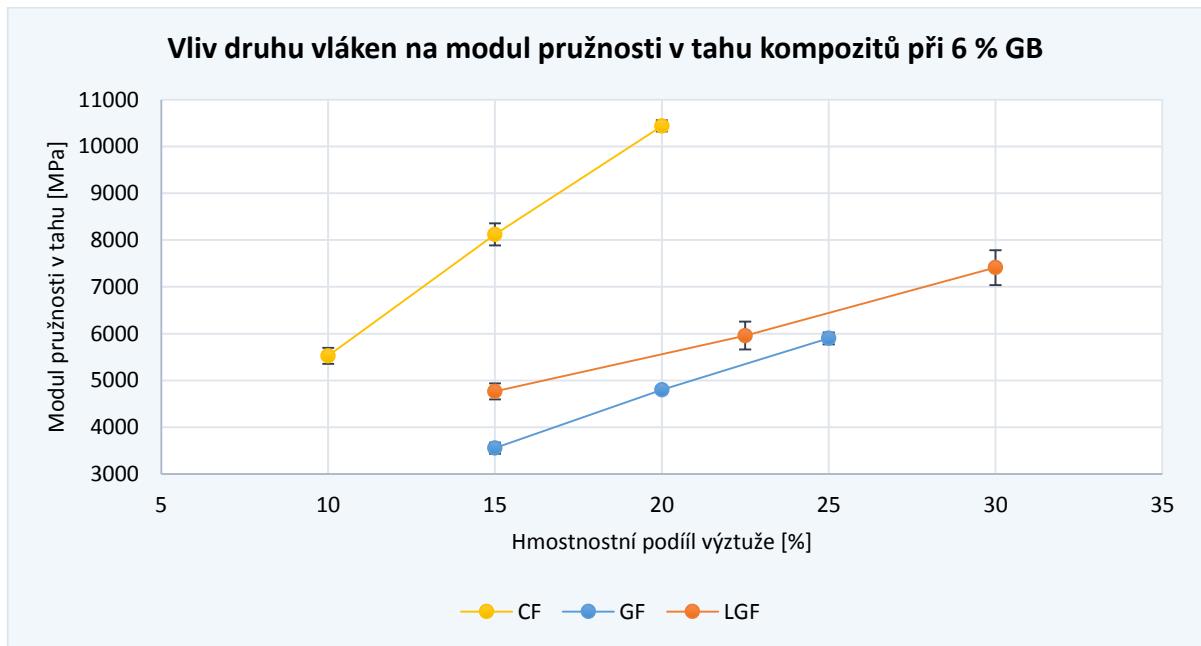
**Obr. 51** Závislost modulu pružnosti v tahu na množství a typu vláken u „klasických kompozitů“ na bázi matrice PA 66



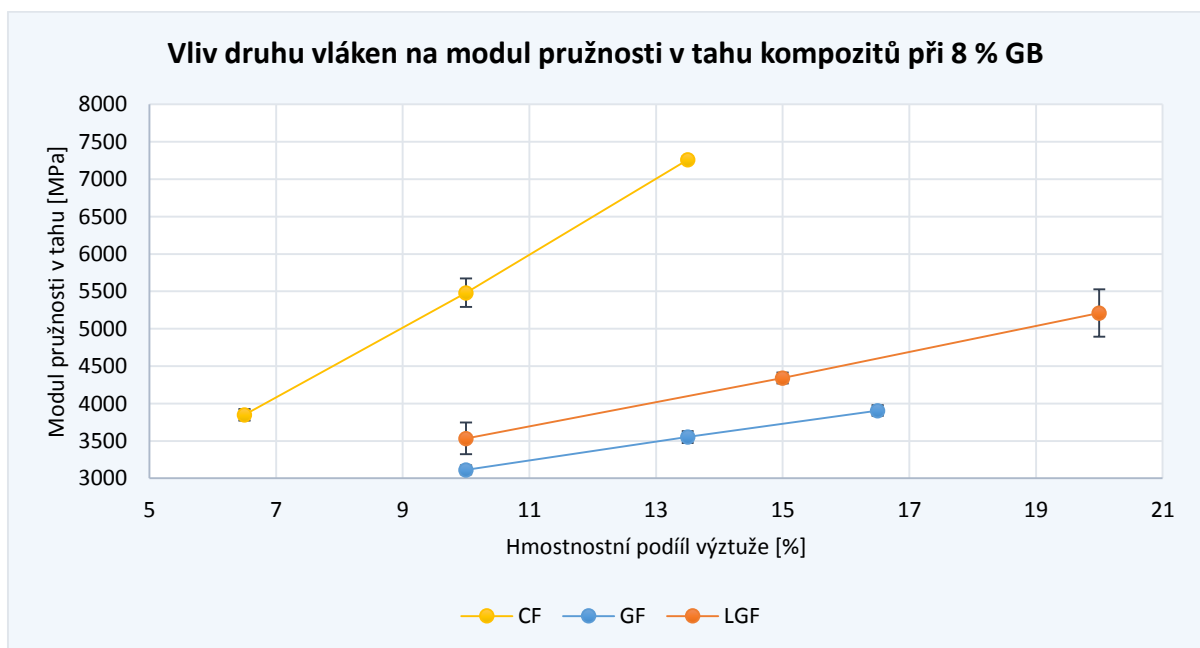
**Obr. 52** Závislost modulu pružnosti v tahu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 4 % dutých skleněných kuliček

Na obr. 52 ÷ obr. 54 jsou znázorněny závislosti hodnot  $E_t$  hybridních kompozitů vyztužených třemi druhy vláken a 4 %, 6 % nebo 8 % dutých skleněných kuliček (GB). Průběhy křivek jsou podobné jako u „klasických kompozitů“, ale vlivem dutých skleněných kuliček dosahují hybridní kompozity vyšších hodnot  $E_t$ . Nejvyšší  $E_t$  vykazují hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny. Například kompozit se 4 % GB a 20 % CF vykazuje hodnoty modulu

pružnosti vyšší o 128 % v porovnání s kompozitem se 4 % GB a 20 % GF a o 94 % v porovnání s kompozitem 4 % GB a 20 % LGF (viz obr. 52). Na Obr. 53 a obr. 54 jsou znázorněny podobné závislosti modulu pružnosti v tahu hybridních kompozitů na druhu vyztužujících vláken při množství 6 % nebo 8 % GB. Podobně jako u pevnosti v tahu, jsou v příloze 4 na str. P20 ÷ P21 k nahlédnutí grafické závislosti s procentuálním zvýšením modulu pružnosti v ohybu pro všechny zkoumané kombinace hybridních kompozitů



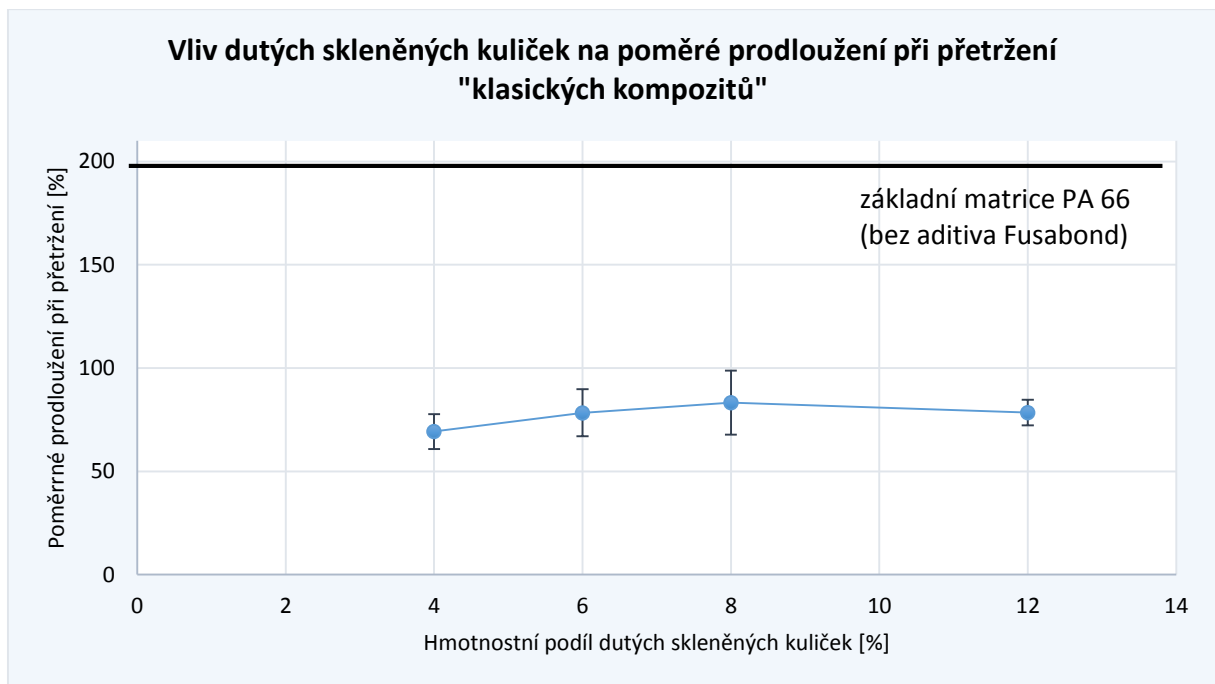
**Obr. 53** Závislost modulu pružnosti v tahu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 6 % dutých skleněných kuliček



**Obr. 54** Závislost modulu pružnosti v tahu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 8 % dutých skleněných kuliček

### 4.1.3 Poměrné prodloužení při přetržení

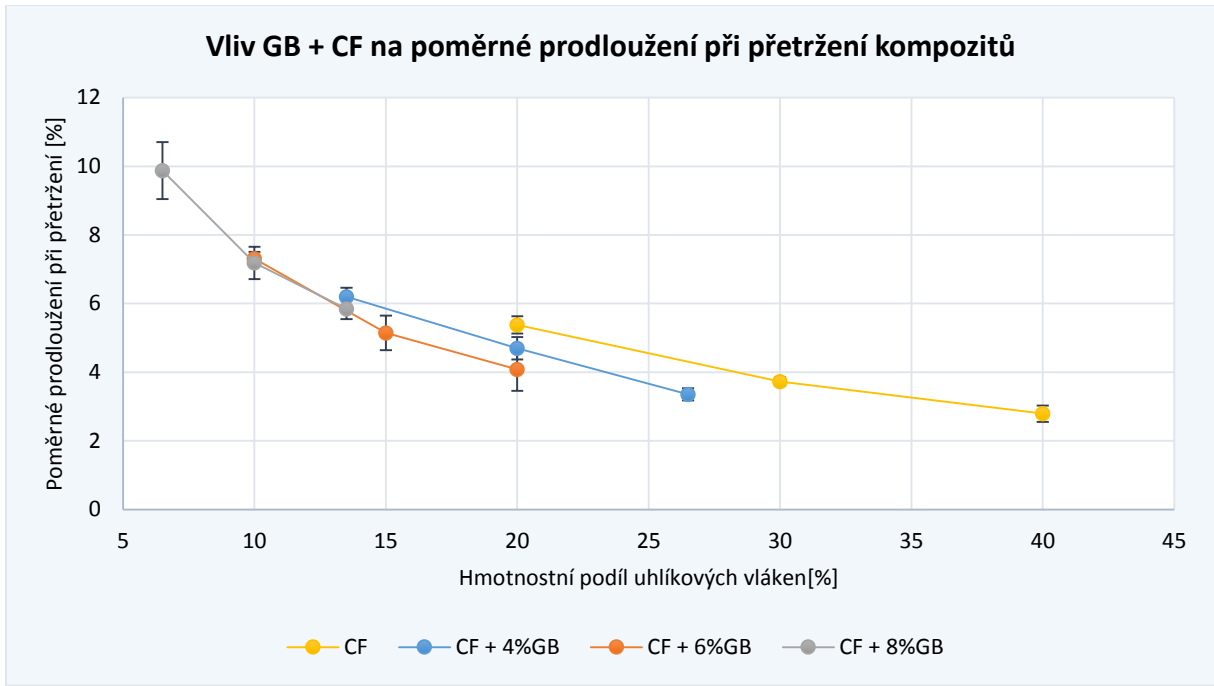
Poslední zkoumanou tahovou charakteristikou je poměrné prodloužení při přetržení ( $\epsilon_b$ ) kompozitních materiálů, resp. jejich celková tažnost. Vliv dutých skleněných kuliček je v tomto případě negativní. Oproti čisté PA matici došlo přidáním dutých skleněných kuliček ke snížení  $\epsilon_b$  o více než 140 % (viz obr. 55). Sledované množství dutých skleněných kuliček v kompozitním systému nemá významný vliv na změnu hodnoty poměrného prodloužení při přetržení (s ohledem na směrodatné odchylky).



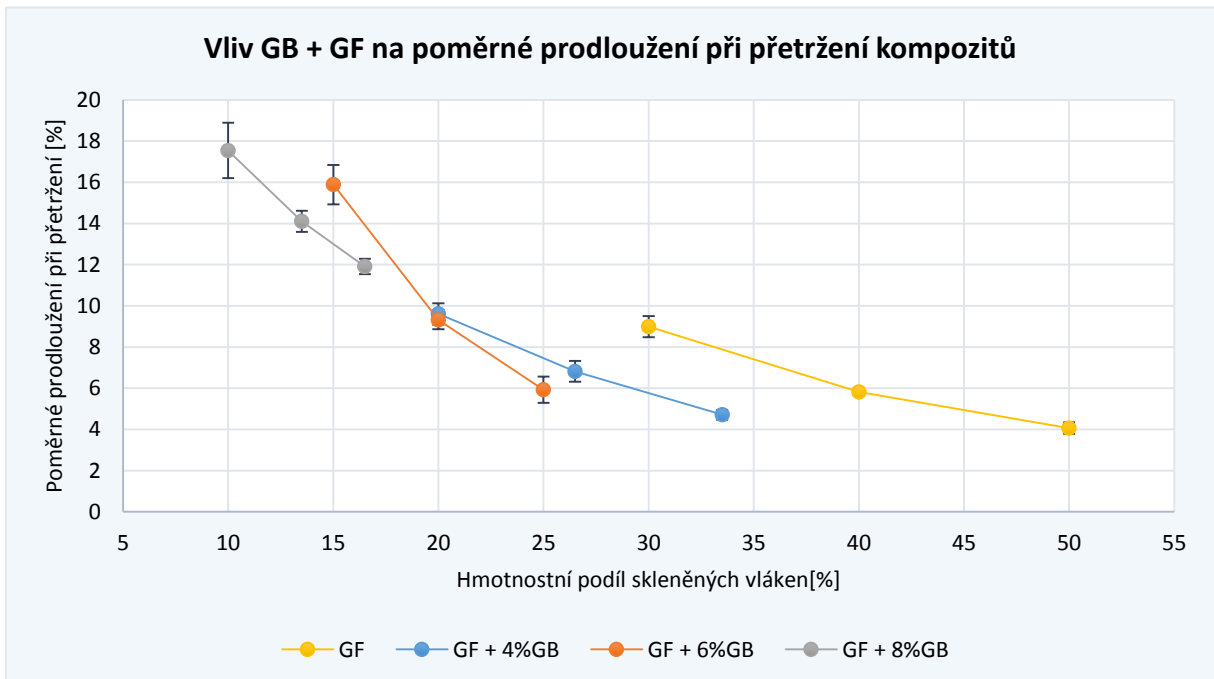
**Obr. 55** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na podílu dutých skleněných kuliček u kompozitů na bázi PA 66

Poměrné prodloužení při přetržení kompozitů vyztužených uhlíkovými nebo krátkými skleněnými vlákny je znázorněno na obr. 56 a obr. 57. „Klasické kompozity“ s uhlíkovými vlákny nebo krátkými skleněnými vlákny vykazují vyšších hodnot  $\epsilon_b$  než hybridní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny (CF) nebo krátkými skleněnými vlákny (GF) a dutými skleněnými kuličkami (GB). Se zvyšujícím se množstvím dutých skleněných kuliček hodnoty  $\epsilon_b$  hybridních kompozitů klesají, což je ve shodě s obr. 55. Pokles hodnot  $\epsilon_b$  hybridních kompozitů se pohybuje okolo (10 ÷ 30) % v závislosti na množství dutých skleněných kuliček. Na obr. 56 lze vidět pokles poměrného prodloužení hybridních kompozitů se 4 % nebo 6 % GB při 20 % uhlíkových vláken v porovnání s klasickým kompozitem vyztuženým pouze 20 % uhlíkových vláken. „Klasický kompozit“ s uhlíkovými vlákny má hodnotu  $\epsilon_b$  5,4 %, což je o 13 % více než u hybridního kompozitu s 4 % GB a 20 % CF a o 25 % více než u hybridního kompozitu s 6 % GB a 20 % CF. Je tedy zřejmé, že uhlíková a krátká skleněná vlákna, stejně jako duté skleněné

kuličky poměrné prodloužení při přetržení snižují. Z teoretických poznatků bylo zjištěno, že vyztužující vlákna mají vysokou měrnou pevnost a nízkou hodnotu poměrného prodloužení, které pravděpodobně způsobuje snížení poměrného prodloužení v porovnání se základní polymerní maticí.



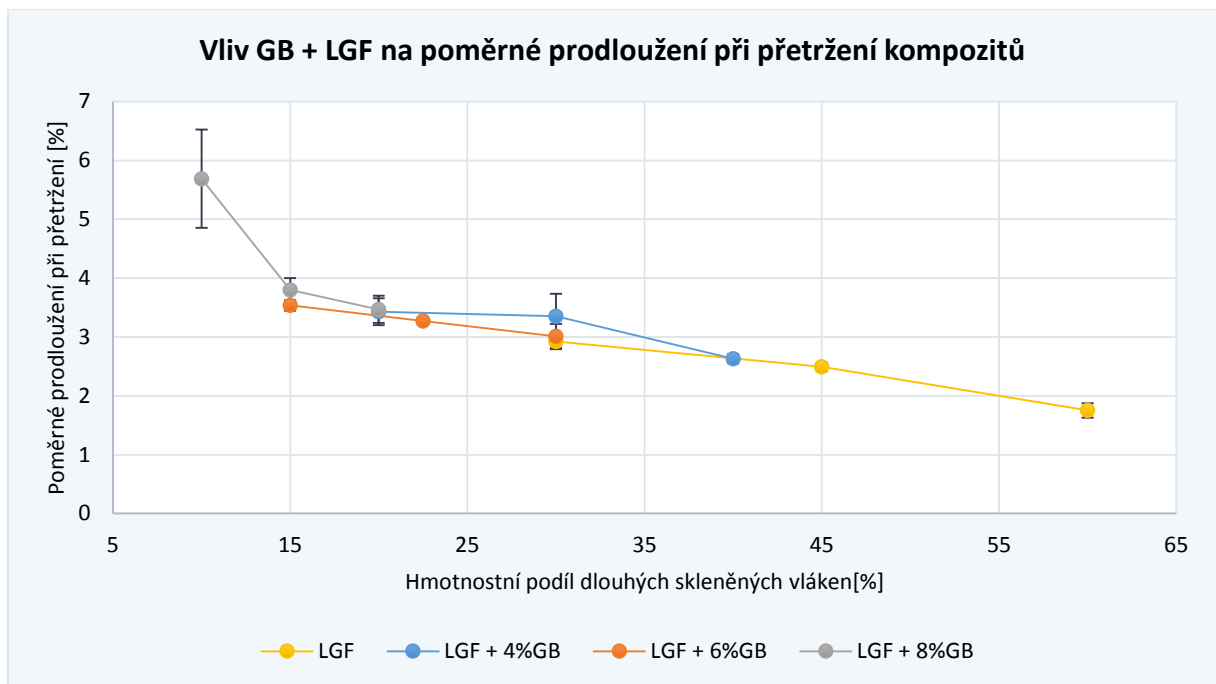
**Obr. 56** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na množství dutých skleněných kuliček a uhlíkových vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66



**Obr. 57** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na množství dutých skleněných kuliček a krátkých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

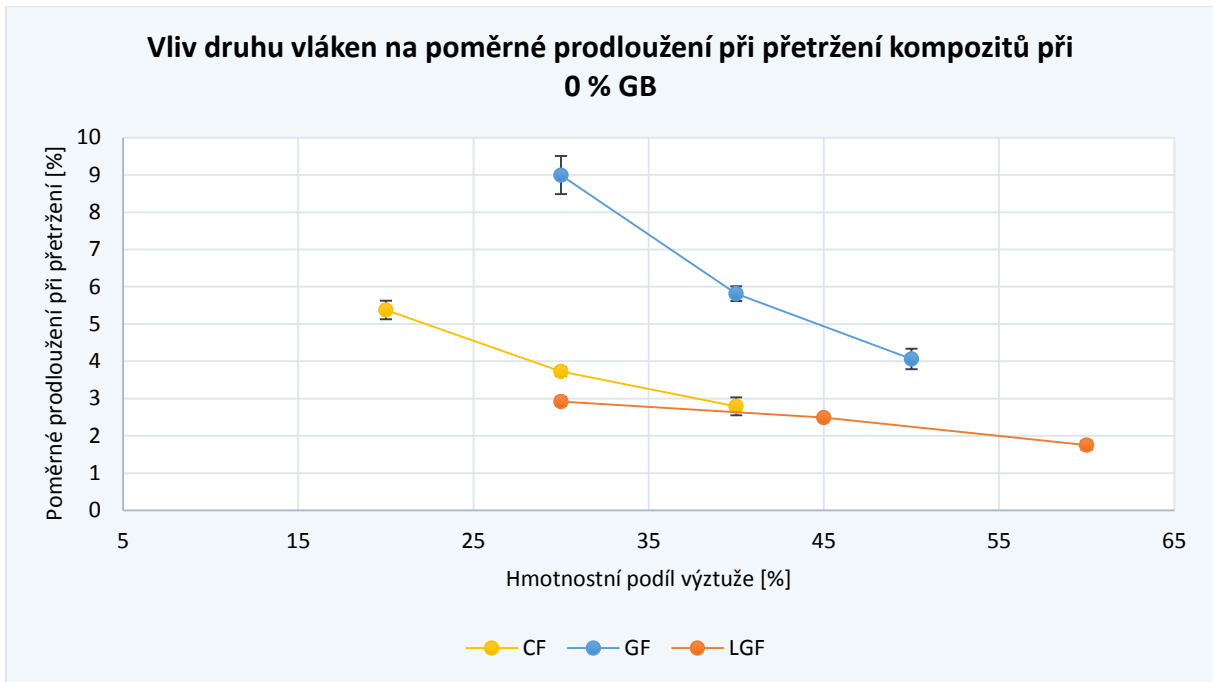


Kompozity vyztužené dlouhými skleněnými vlákny (LGF) vykazovaly odlišné chování. Přidáním dutých skleněných kuliček (GB) do kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny nedošlo oproti „klasickému kompozitu“ (vyztuženého pouze LGF) k výraznému snížení poměrného prodloužení při přetržení (viz obr. 58). Například „klasický kompozit“ se 30 % dlouhých skleněných vláken vykazuje téměř stejné hodnoty poměrného prodloužení při přetržení jako kompozit se 6 % GB a 30 % LGF. Je zde tedy zřejmé, že duté skleněné kuličky mají v kombinaci s dlouhými skleněnými vlákny nižší vliv na výsledné hodnoty  $\varepsilon_b$  kompozitu, než tomu bylo u kompozitů vyztužených CF a GF.



**Obr. 58** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na množství dutých skleněných kuliček a dlouhých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Čistý PA 66 má hodnotu prodloužení při přetržení více než 200 % (viz tab. 9). Z obr. 59 je tedy patrné, že všechny kompozity vyztužené třemi druhy vláken mají mnohem nižší hodnotu poměrného prodloužení při přetržení. Ze získaných poznatků v teoretické části se potvrdilo, že nejmenší vliv na prodloužení při přetržení kompozitů by měly mít krátká skleněná vlákna vzhledem k jejich největší tažnosti, která činí až 6 % (viz tab. 4). Mnohem nižší prodloužení je zaznamenáno u kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny, které mají tažnost okolo 2 % (viz tab. 3). Nejnižších hodnot je dosaženo u kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny, které by měly mít větší tažnost než kompozity s uhlíkovými vlákny, ale délka vláken nebo jiné uspořádání dlouhých vláken v matrici má pravděpodobně negativní vliv na poměrné prodloužení při přetržení kompozitu. Například „klasický kompozit“ s 30 % GF má hodnotu poměrného prodloužení při přetržení 9 %, což je o 140 % více než u kompozitu s uhlíkovými vlákny (CF) a o 208 % více než u kompozitu s dlouhými skleněnými vlákny (LGF).

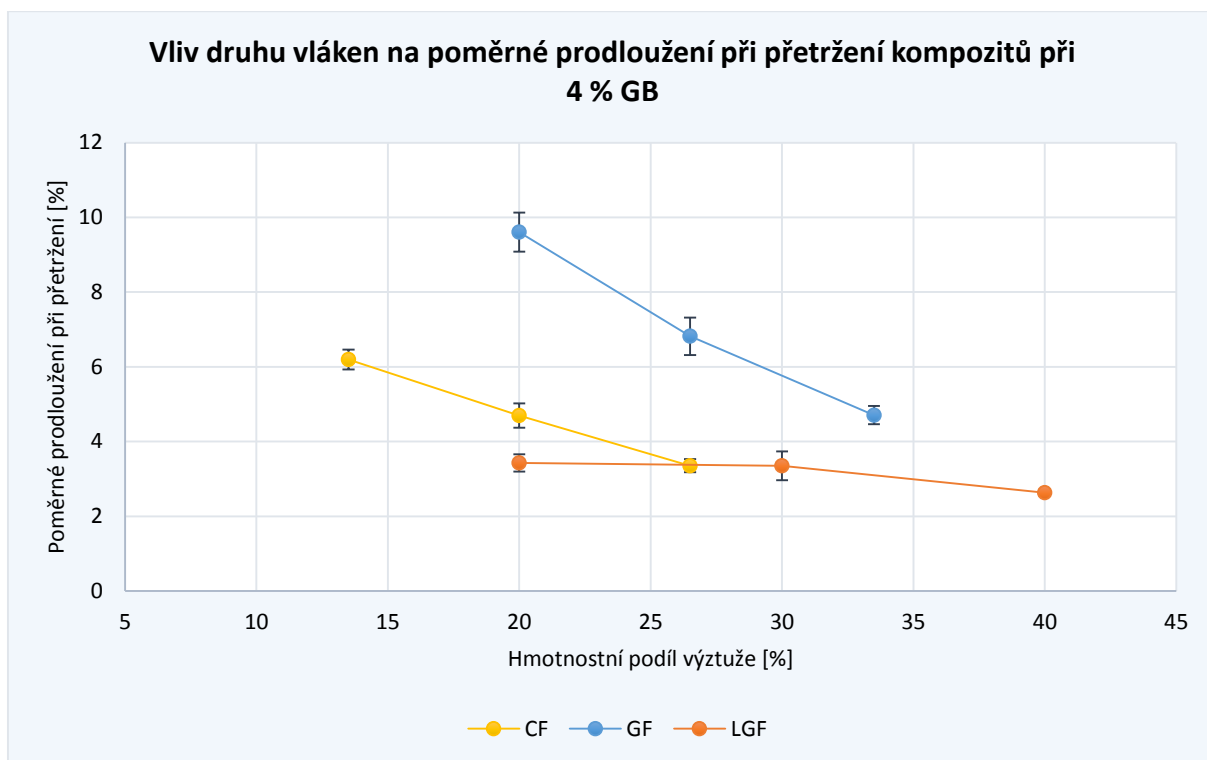


**Obr. 59** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na množství a typu vláken u „klasických kompozitů“ na bázi matrice PA 66

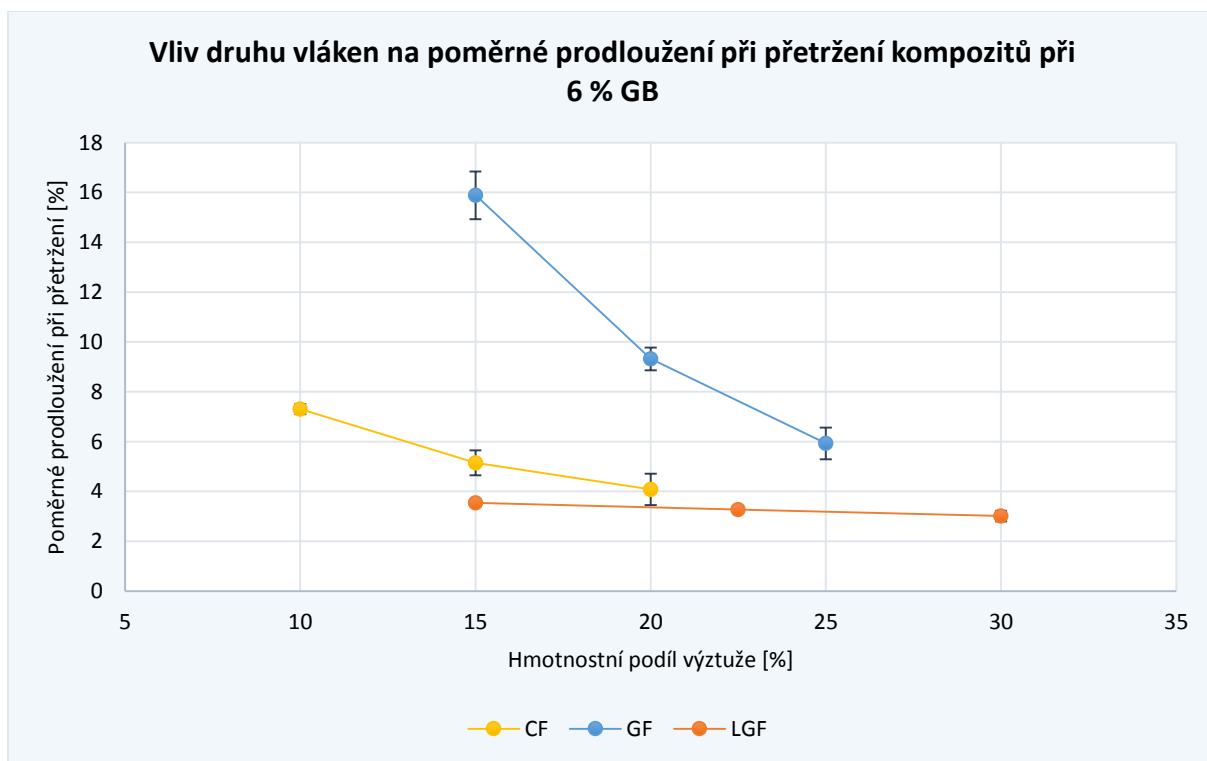
V případě hybridních kompozitů se 4 % dutých skleněných kuliček vykazují nejvyšší poměrné prodloužení při přetržení opět kompozity vyztužené krátkými skleněnými vlákny (viz obr. 60). Oproti kompozitům vyztužených uhlíkovými (CF) nebo dlouhými skleněnými vlákny (LGF) mají kompozity s krátkými skleněnými vlákny (GF) až o 50 % vyšší poměrné prodloužení při přetržení (při 20 % vyztužujících vláken). Při vzájemném porovnání kompozitů s uhlíkovými nebo dlouhými skleněnými vlákny vykazují kompozity s uhlíkovými vlákny vyšší hodnoty  $\epsilon_b$  (například při 20 % vláken až o 37 %). V případě hybridních kompozitů s uhlíkovými vlákny je viditelný významný pokles poměrného prodloužení s rostoucím množstvím vlákenné výztuže. Kompozity s dlouhými skleněnými vlákny mají se stoupajícím množstvím dlouhých skleněných vláken (LGF) minimální změnu  $\epsilon_b$ .

Na obr. 61 a obr. 62 jsou uvedeny obdobné závislosti hybridních kompozitů se 6 % nebo 8 % dutých skleněných kuliček. Hybridní kompozity s 6 % GB a 15 % krátkých skleněných vláken vykazují ještě vyšších nárůstů  $\epsilon_b$  v porovnání s kompozity s uhlíkovými a dlouhými skleněnými vlákny (viz obr. 61). Při 15 % krátkých skleněných vláken a 6 % dutých skleněných kuliček dosahuje hybridní kompozit poměrného prodloužení při přetržení 16 %, což je o téměř 220 % více než u hybridního kompozitu s 15 % uhlíkových vláken a téměř o 350 % více než u hybridního kompozitu s 15 % dlouhých skleněných vláken. U kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny nedochází s vyšším množstvím vláken k výraznému poklesu  $\epsilon_b$ . Kompozity s 15 % LGF a 30 % LGF vykazují pokles poměrného prodloužení při přetržení pouze 0,5 % (viz obr. 61).

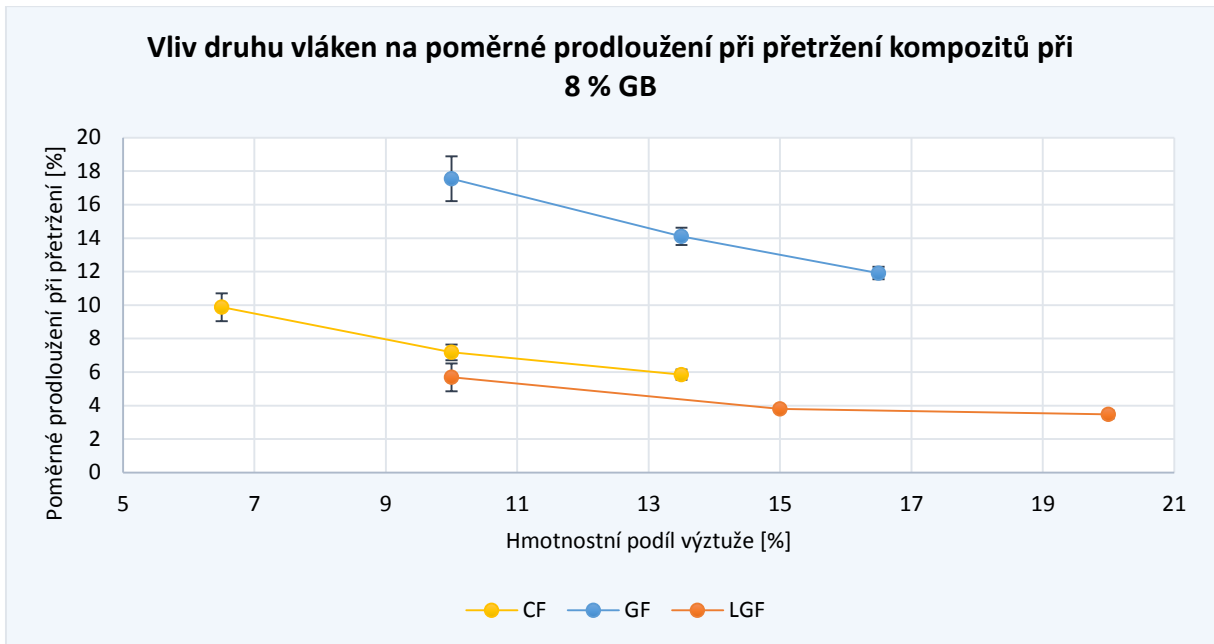
V příloze 4 na str. P22 ÷ P23 jsou uvedeny hodnoty  $\epsilon_b$  s procentuální změnou (vzhledem k čisté polymerní matrici PA 66) u všech zkoumaných kompozitů.



**Obr. 60** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 4 % dutých skleněných kuliček



**Obr. 61** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 6 % dutých skleněných kuliček

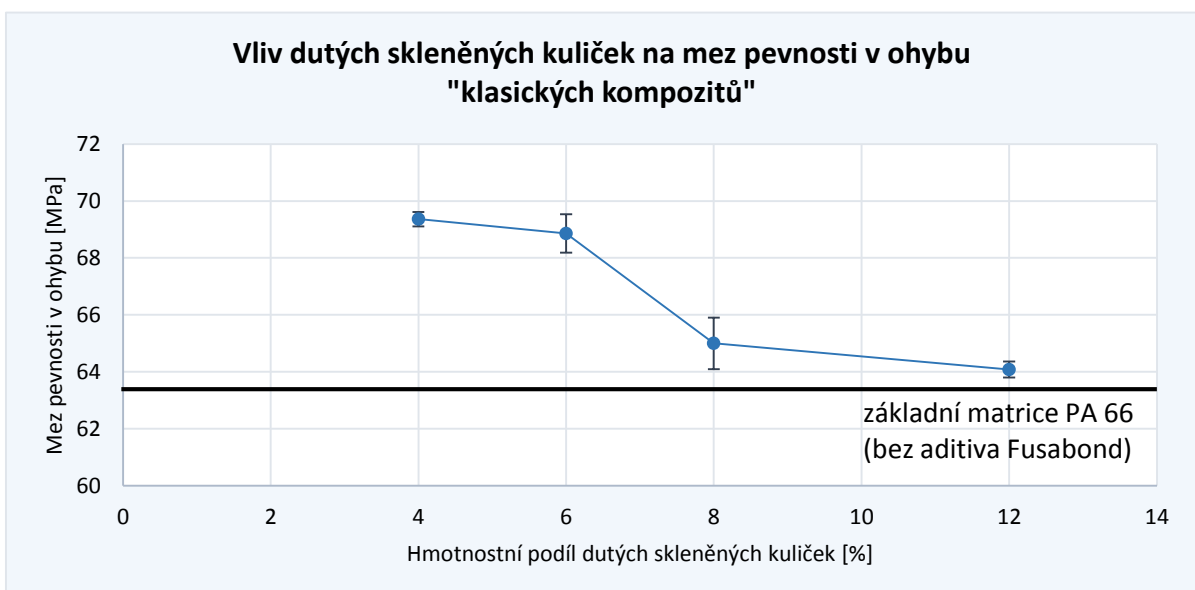


**Obr. 62** Závislost poměrného prodloužení při přetržení na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 8 % dutých skleněných kuliček

## 4.2 Zhodnocení ohybových vlastností hybridních kompozitů

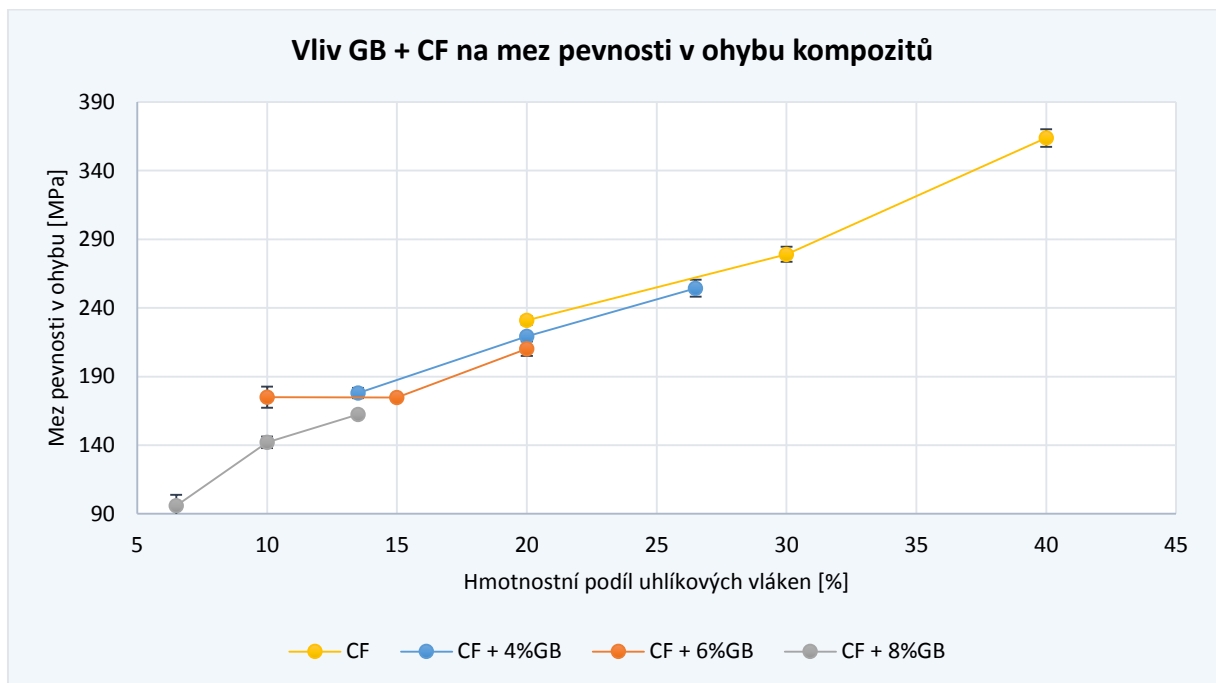
### 4.2.1 Mez pevnosti v ohybu

Podobně jako u tahových charakteristik je nejdříve znázorněn vliv dutých skleněných kuliček na mez pevnosti v ohybu kompozitu ( $\sigma_{FM}$ ). Kompozity s nižším množstvím dutých skleněných kuliček vykazovaly nárůst meze pevnosti v ohybu cca o 10 % oproti matrici PA 66 neobsahující adhezní činidlo Fusabond. Se zvyšujícím se množstvím GB dochází k poklesu meze pevnosti v ohybu (viz obr. 63).



**Obr. 63** Závislost meze pevnosti v ohybu na podílu dutých skleněných kuliček u kompozitů na bázi PA 66

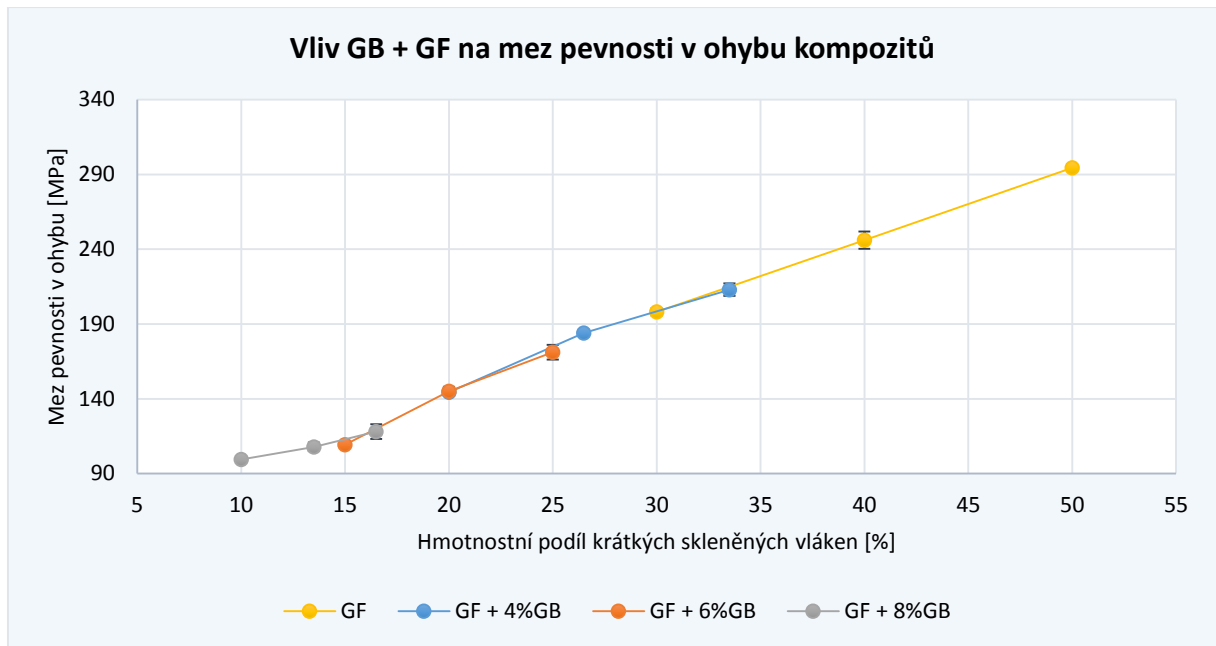
Na obr. 64 je znázorněn vliv dutých skleněných kuliček na mez pevnosti v ohybu u kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny. Se zvyšujícím se množstvím dutých skleněných kuliček je zřejmý pokles meze pevnosti hybridních kompozitů oproti „klasickým kompozitům“ vyztužených pouze uhlíkovými vlákny (viz obr. 64). Například oproti „klasickému kompozitu“ vyztuženého 20 % uhlíkových vláken došlo přidáním 4 % GB ke snížení meze pevnosti v ohybu o 5 % a přidáním 6 % GB ke snížení meze pevnosti v ohybu o 9 %. Obdobně jako u meze pevnosti v tahu lze tedy říci, že uhlíková vlákna mez pevnosti v ohybu zvyšují, zatímco duté skleněné kuličky jí snižují. V případě kombinace uhlíkových vláken a dutých skleněných kuliček dochází k poklesu meze pevnosti v ohybu oproti „klasickým kompozitům“ vyztužených pouze uhlíkovými vlákny. Opět je zde důležitým faktorem porovnání tzv. měrná pevnost, která při větším hmotnostním podílu dutých skleněných kuliček v hybridních kompozitech může být příznivější než u „klasických kompozitů“.



**Obr. 64** Závislost meze pevnosti v ohybu na množství dutých skleněných kuliček a uhlíkových vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

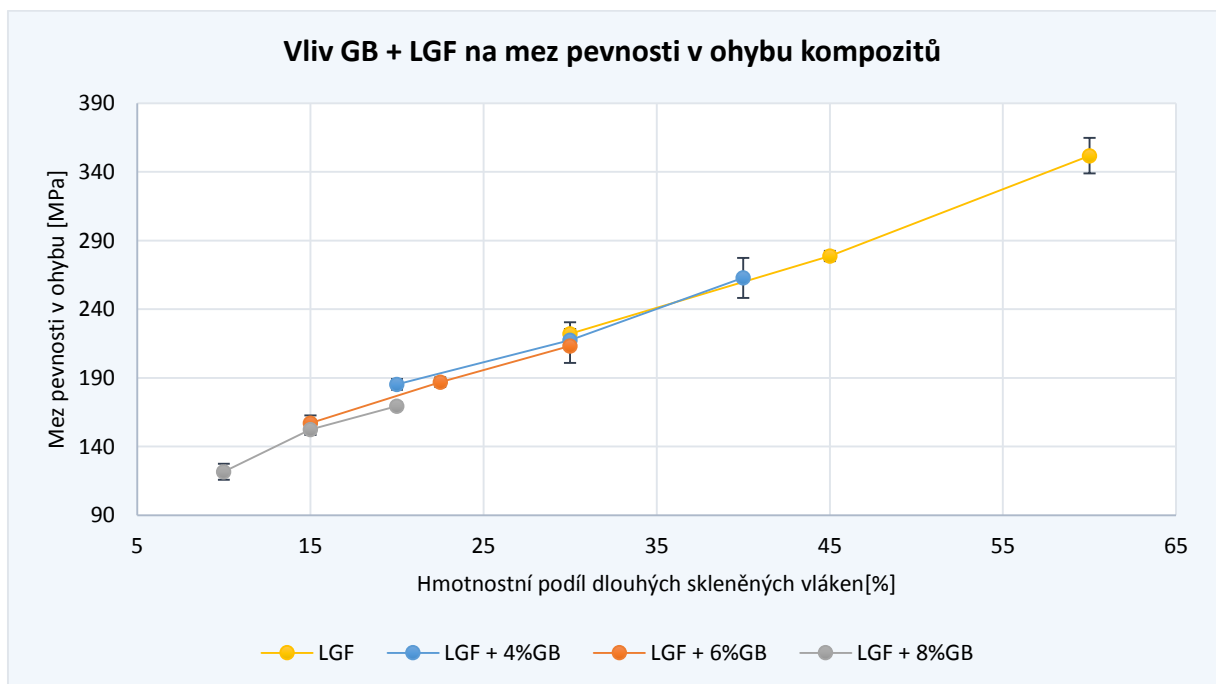
Hybridní kompozity vyztužené krátkými skleněnými vlákny vykazují téměř stejné meze pevnosti v ohybu bez ohledu na množství dutých skleněných kuliček v kompozitu (viz obr. 65), obdobně jako tomu bylo při hodnocení meze pevnosti v tahu (viz obr. 41). Při pohledu na obr. 65 tvoří všechny kombinace hybridních kompozitů vyztužených GF téměř jednu křivku. V případě hybridních kompozitů s krátkými skleněnými vlákny je tedy průběh odlišný v porovnání s hybridními kompozity vyztužených uhlíkovým vlákny, kde byl naopak vliv dutých skleněných kuliček na hodnotu  $\sigma_{FM}$  zaznamenán. V případě vyššího množství GB v hybridních kompozitech (vyššího množství než v provedených experimentech) vyztužených krátkými

skleněnými vlákny lze předpokládat, že mohou mít vyšší tzv. měrnou pevnost než „klasické kompozity“ bez dutých skleněných kuliček.



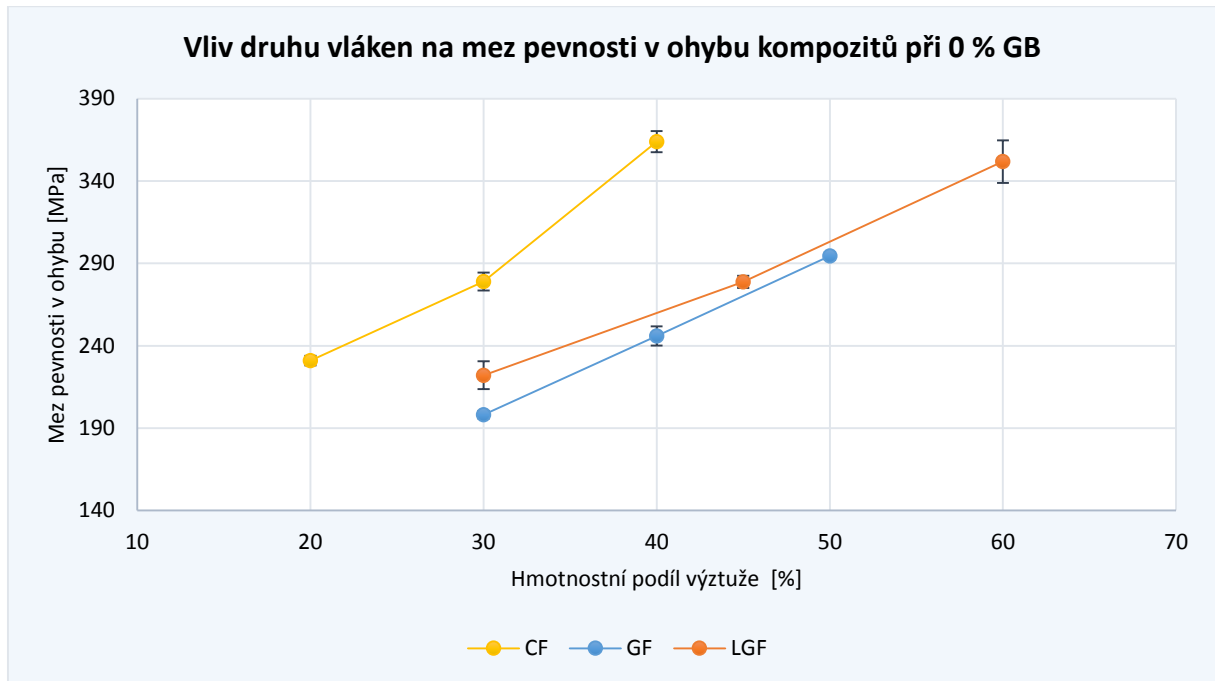
**Obr. 65** Závislost meze pevnosti v ohybu na množství dutých skleněných kuliček a krátkých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Podobný průběh jako u kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny je i u kompozitů vyztužených dlouhými skleněnými vlákny (viz obr. 66). Duté skleněné kuličky v hybridních kompozitech s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) způsobují ve všech případech mírný pokles meze pevnosti v ohybu (s ohledem na hodnoty směrodatných odchylek).



**Obr. 66** Závislost meze pevnosti v ohybu na množství dutých skleněných kuliček a dlouhých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

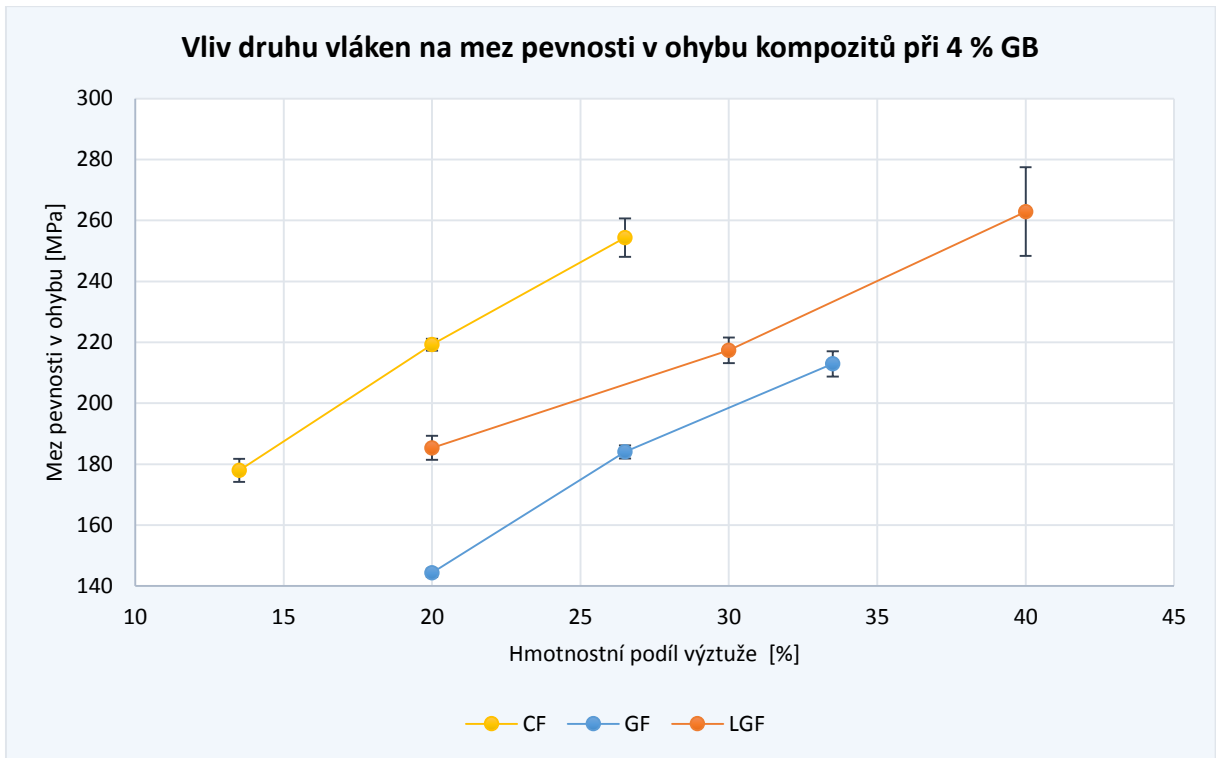
Přidání vyztužujících vláken do matrice PA 66 způsobilo zvýšení meze pevnosti v ohybu kompozitu. Nejvyšší změny dosahují „klasické kompozity“ s uhlíkovými vlákny. Při porovnání krátkých (GF) a dlouhých skleněných vláken (LGF) je vidět pozitivní vliv délky vláken na mez pevnosti v ohybu kompozitu. Kompozity s 30 % CF, 30 % LGF a 30% GF vykazují oproti PA 66 nárůst hodnot  $\sigma_{fM}$  o 343 %, 252 % a 214 % (viz obr. 67).



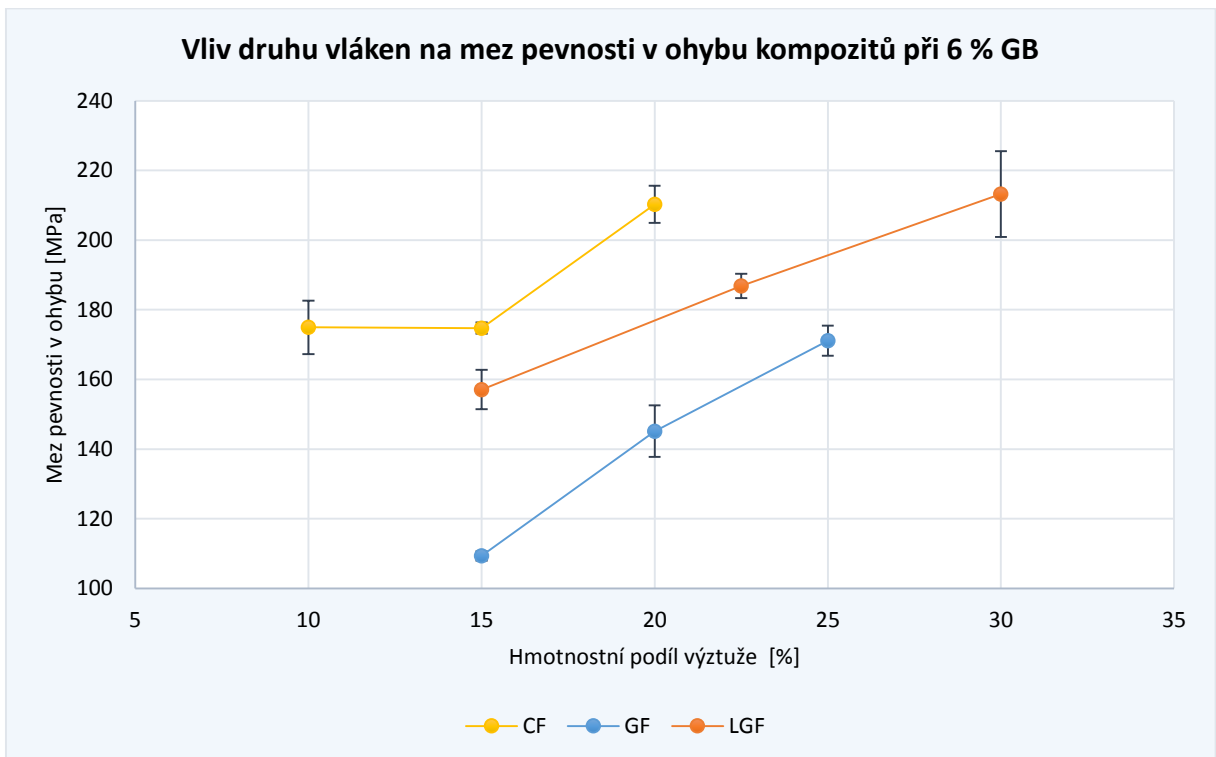
**Obr. 67** Závislost meze pevnosti v ohybu na množství a typu vláken u „klasických kompozitů“ na bázi matrice PA 66

V případě hybridních kompozitů platí opět, že kompozity s větším množstvím vláken dosahují vyšších hodnot meze pevnosti v porovnání s PA matricí ( $\sigma_{fM} = 63$  MPa). Nejvyšších hodnot meze pevnosti hybridních kompozitů dosahují kompozity s uhlíkovými vlákny. Kompozit se 4 % GB a 20 % CF dosahuje meze pevnosti v ohybu 220 MPa (viz obr. 68). Oproti kompozitu s 20 % uhlíkových vláken došlo při použití 20 % dlouhých skleněných vláken k poklesu pevnosti v ohybu kompozitu o 15 %, resp. o 35 % v případě kompozitu s krátkými skleněnými vlákny. LGF jsou tedy z hlediska přenosu zatížení v ohybu lepší variantou než GF. Podobně jako u tahových charakteristik je možné nalézt vysvětlení ve vyšším množství napěťových špiček u krátkovláknových kompozitů nebo v odlišném uspořádání vláken v matrici. Nejvyšších hodnot meze pevnosti v ohybu ze všech měřených hybridních kompozitů dosahuje kompozit se 4 % GB a 40 % LGF ( $\sigma_{fM} = 263$  MPa). Téměř stejné hodnoty meze pevnosti v ohybu ( $\sigma_{fM} = 254$  MPa) avšak při menším množství vlákně výtzuže je zaznamenáno u kompozitu se 4 % GB a 26,5 % CF.

Na obr. 69 a obr. 70 jsou uvedeny obdobné závislosti hybridních kompozitů s 6 % nebo 8 % dutých skleněných kuliček.

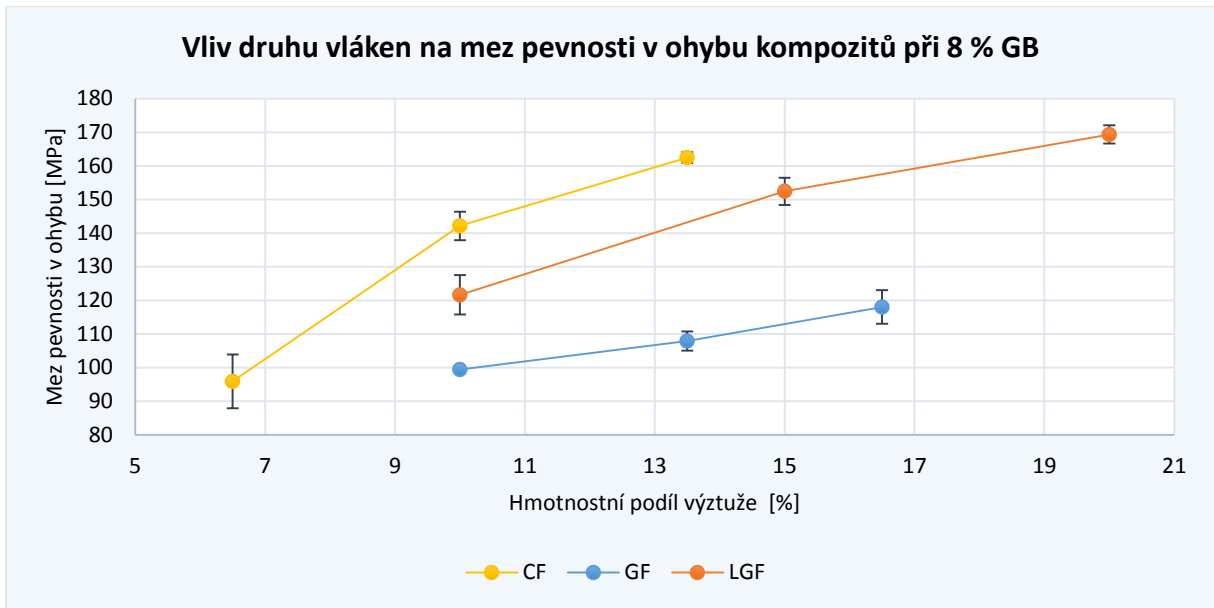


**Obr. 68** Závislost meze pevnosti v ohybu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 4 % dutých skleněných kuliček



**Obr. 69** Závislost meze pevnosti v ohybu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 6 % dutých skleněných kuliček

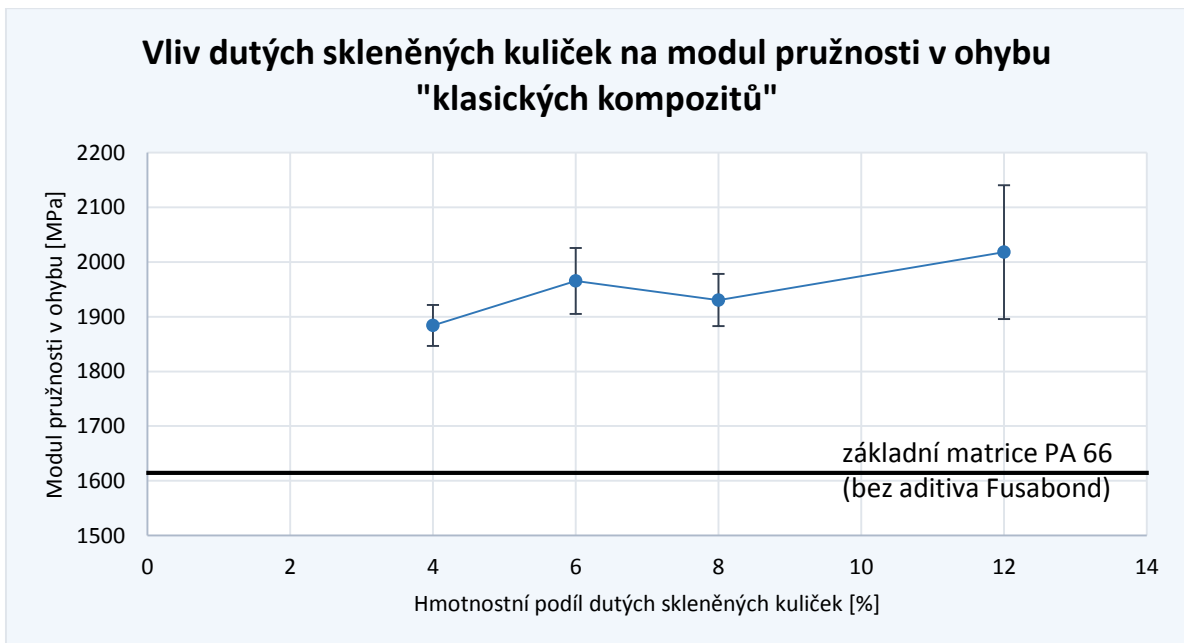




**Obr. 70** Závislost meze pevnosti v ohybu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 8 % dutých skleněných kuliček

#### 4.2.2 Modul pružnosti v ohybu

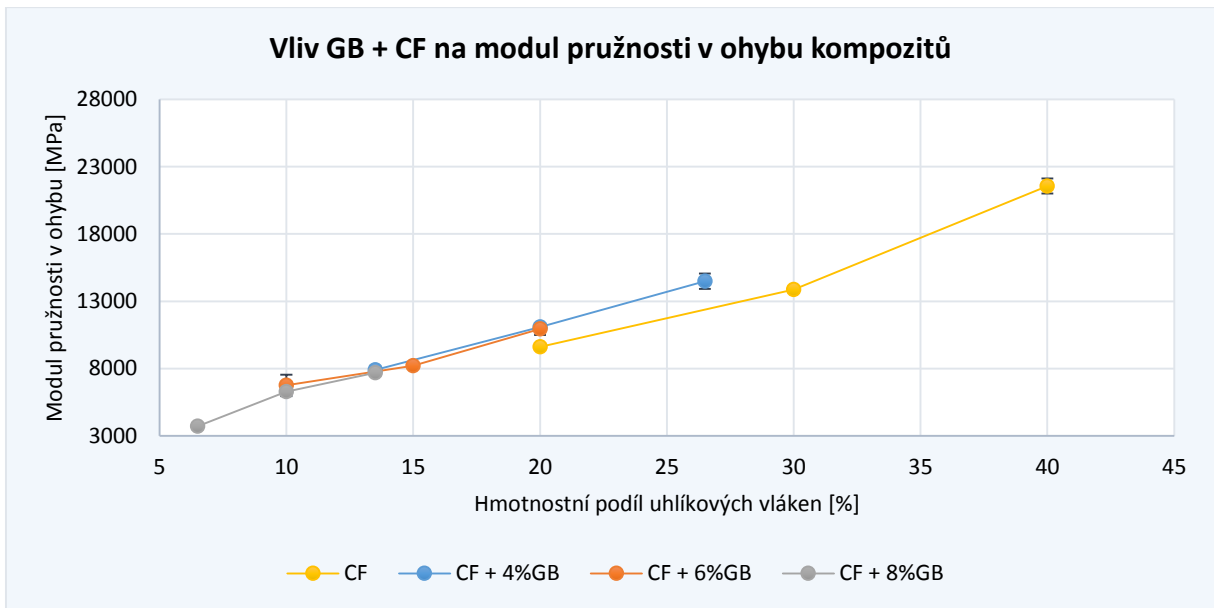
Přidáním dutých skleněných kuliček do základní polymerní matrice se zvýší modul pružnosti v ohybu kompozitu ( $E_f$ ) v průměru o 23 %, ale zvýšení hmotnostního zastoupení dutých skleněných kuliček, ve sledovaném množství 4 % až 12 %, nemá s ohledem na směrodatné odchylky na hodnotu modulu pružnosti výrazný vliv (viz obr. 71). Rozdíl v hodnotě  $E_f$  při 4 % a 12 % dutých skleněných kuliček je pouze 5 %.



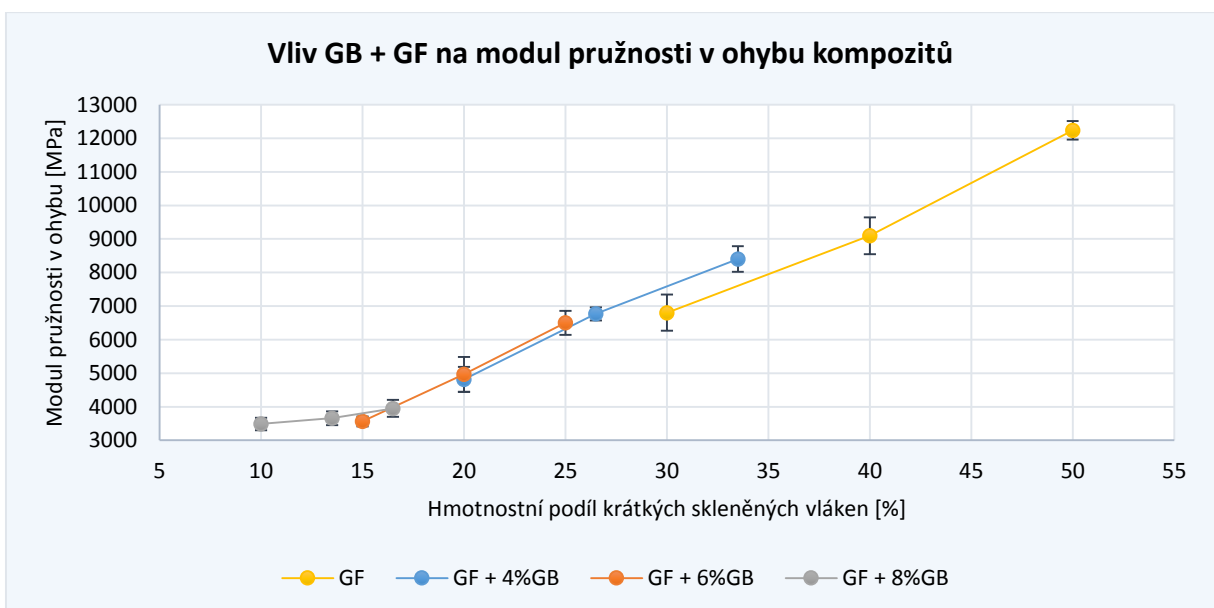
**Obr. 71** Závislost modulu pružnosti v ohybu na podílu dutých skleněných kuliček u kompozitů na bázi PA 66

Na obr. 72 až obr. 74 je znázorněna závislost modulu pružnosti v ohybu na druhu vláknenné výztuže a množství dutých skleněných kuliček. Přidáním dutých skleněných kuliček

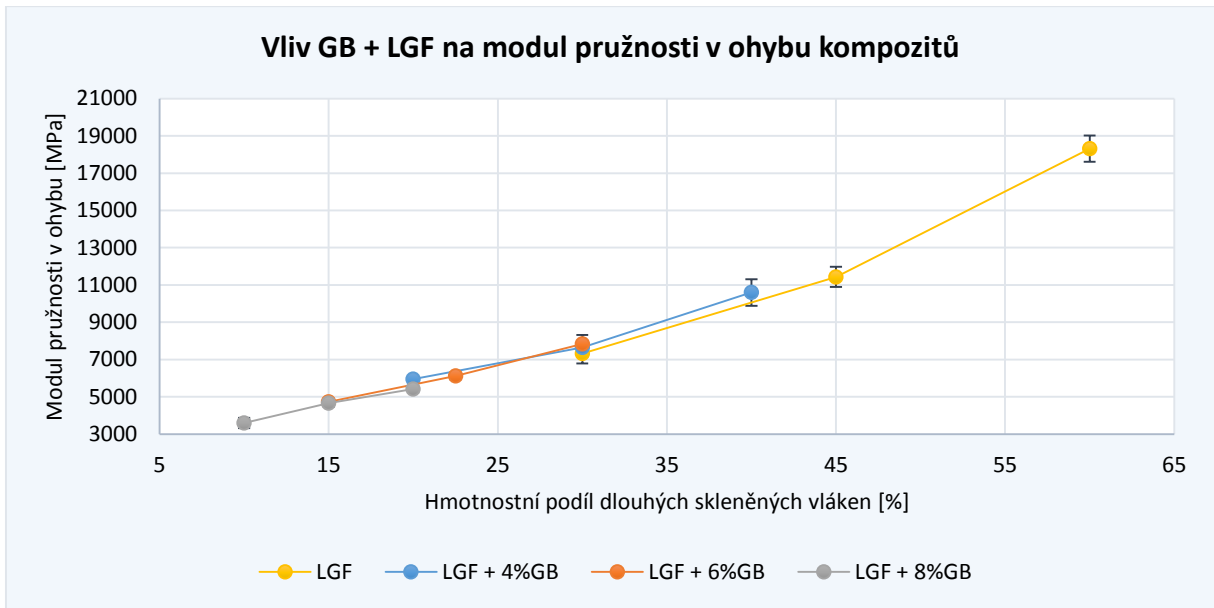
do kompozitů vyztužených uhlíkovými, krátkými nebo dlouhými skleněnými vlákny došlo ke zvýšení modulu pružnosti v ohybu oproti „klasickým kompozitům“ vyztužených pouze vláknou výztuží. Hodnota  $E_f$  hybridního kompozitu 4 % GB a 20 % CF je 11088 MPa, což je téměř o 16 % více než u klasického kompozitu s 20 % CF (viz obr. 72) a o téměř 600 % více než u PA 66. Zvýšené množství GB (ve sledovaném množství) v hybridních kompozitech již nemá na zvýšení hodnoty  $E_f$  výrazný vliv (viz obr. 72 ÷ obr. 74), ale s ohledem na snižující se hustotu kompozitu (u vyššího množství dutých skleněných kuliček) lze očekávat příznivější vliv na měrnou tuhost kompozitu.



**Obr. 72** Závislost modulu pružnosti v ohybu na množství dutých skleněných kuliček a uhlíkových vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

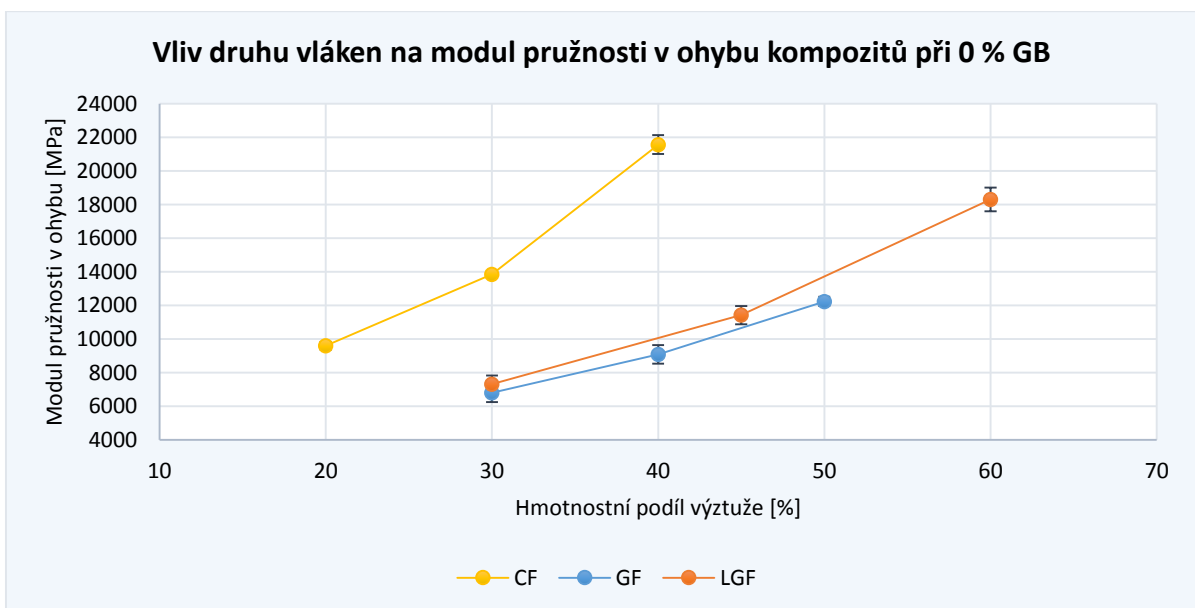


**Obr. 73** Závislost modulu pružnosti v ohybu na množství dutých skleněných kuliček a krátkých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66



**Obr. 74** Závislost modulu pružnosti v ohybu na množství dutých skleněných kuliček a dlouhých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

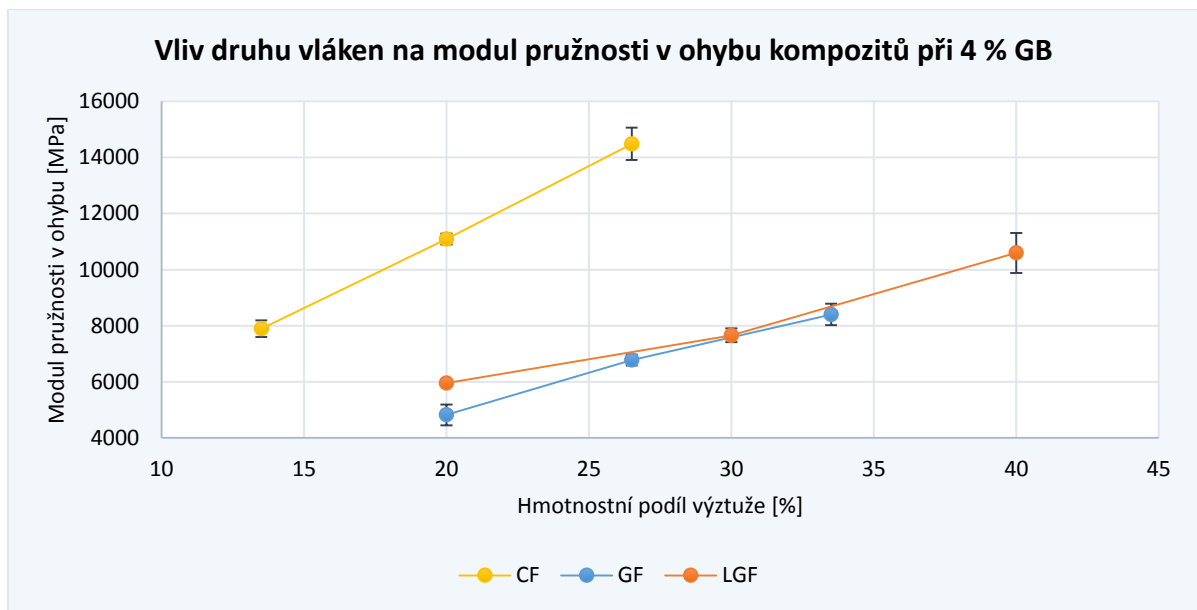
Hodnoty  $E_f$  „klasických kompozitů“ ukazují vzrůstající tendenci se zvýšeným množstvím vláken. Nejvyšších hodnot  $E_f$  dosahují kompozity s uhlíkovými vlákny, následovaný kompozity s dlouhými a krátkými skleněnými vlákny. Například kompozit s 30 % uhlíkových vláken zaznamenal nárůst  $E_f$  oproti základní polymerní matrici o 770 %. Kompozity s LGF a GF vykazují nárůst o 360 %, resp. o 328 %. Podobně jako u meze pevnosti v ohybu vykazují dlouhoválkňové kompozity vyšších hodnot modulu pružnosti v ohybu než krátkoválkňové kompozity. Větší počet krátkých vláken (s tím související větší množství napěťových špiček) pravděpodobně způsobuje snižování modulu pružnosti v ohybu kompozitu.



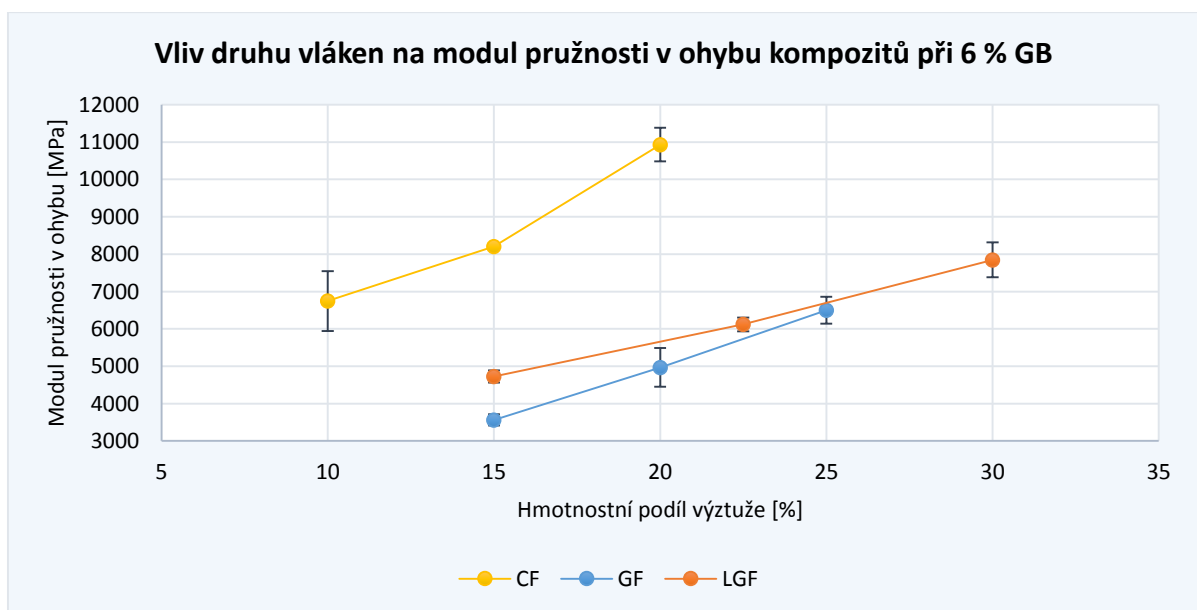
**Obr. 75** Závislost modulu pružnosti v ohybu na množství a typu vláken u „klasických kompozitů“ na bázi matrice PA 66

Chování hybridních kompozitů s ohledem na množství GB je podobné. Nejvyšší hodnoty  $E_f$  mají kompozity vytužené uhlíkovými vlákny. Vykazují také největších změn s rostoucím množstvím vláken. Hybridní kompozit se 4 % GB a 20 % CF dosahuje oproti PA 66 zvýšení modulu pružnosti téměř o 700 %, kompozit s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) o 270 % a kompozit s krátkými skleněnými vlákny (GF) o 203 % (viz obr. 76).

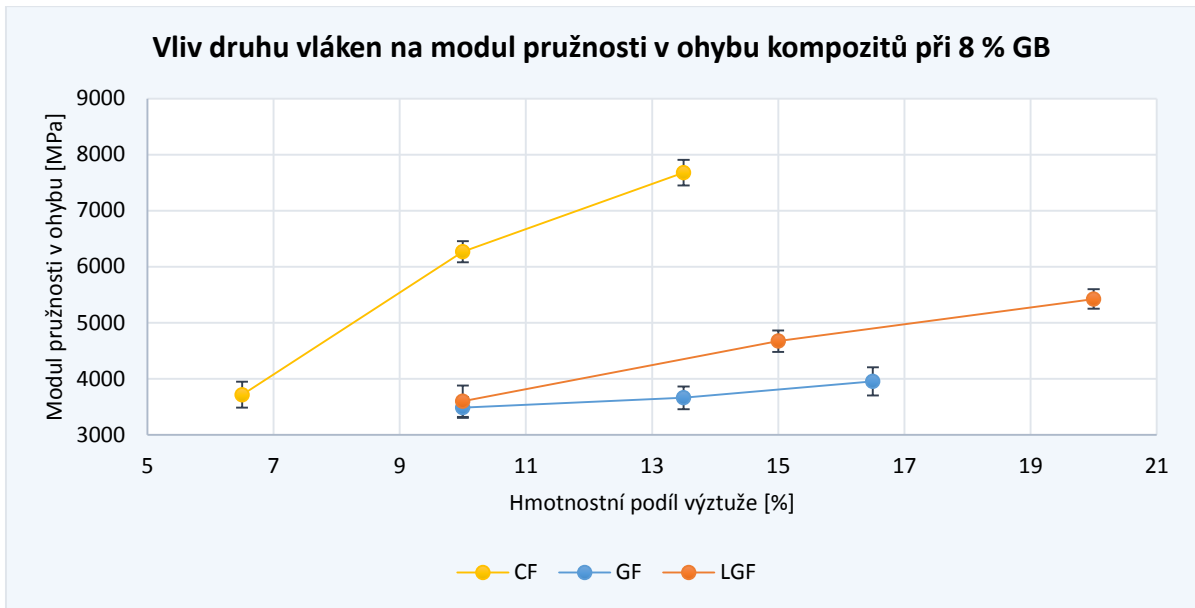
Podobné průběhy jsou i na obr. 77 a obr. 78 znázorňující hybridní kompozity s 6 % a 8 % dutých skleněných kuliček. Procentuální vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu všech ostatních kombinací u hybridních kompozitů je k nahlédnutí v příloze 4 na str. P26 ÷ P27.



**Obr. 76** Závislost modulu pružnosti v ohybu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 4 % dutých skleněných kuliček



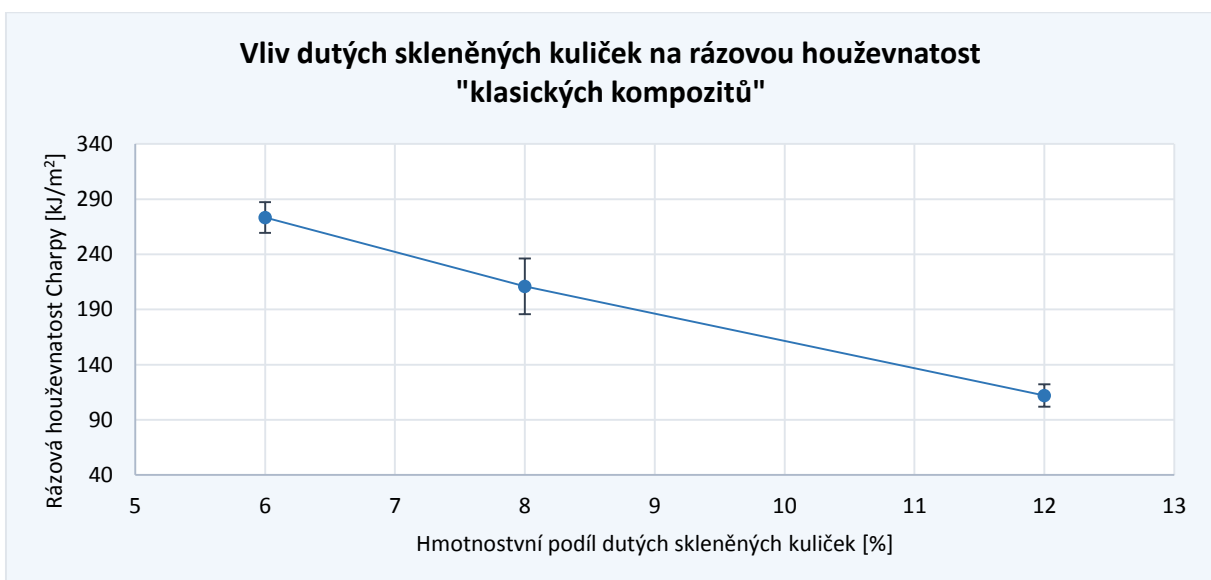
**Obr. 77** Závislost modulu pružnosti v ohybu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 6 % dutých skleněných kuliček



**Obr. 78** Závislost modulu pružnosti v ohybu na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 8 % dutých skleněných kuliček

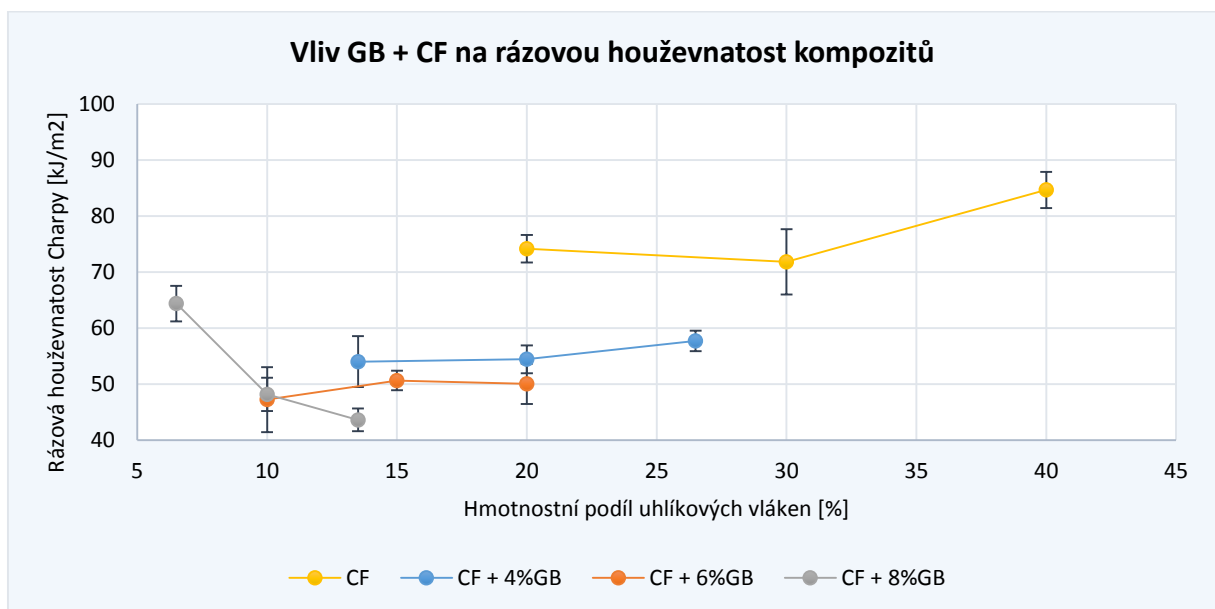
### 4.3 Zhodnocení rázové houževnatosti hybridních kompozitů

Rázová houževnatost Charpy čisté polymerní matrice nebyla zjištěna, protože nedošlo k přeražení vzorku. Následným přidáním 6 %, 8 % a 12 % GB došlo ke snížení rázové houževnatosti „klasických kompozitů“ na 273 kJ/m<sup>2</sup>, 211 kJ/m<sup>2</sup> a 112 kJ/m<sup>2</sup> (viz obr. 79). Zvýšení množství dutých skleněných kuliček z 6 % na 12 % mělo za následek snížení rázové houževnatosti o 59 %. Duté skleněné kuličky mají tedy výrazně nepříznivý vliv na rázovou houževnatost Charpy kompozitů.



**Obr. 79** Závislost rázové houževnatosti Charpy na podílu dutých skleněných kuliček u kompozitů na bázi PA 66

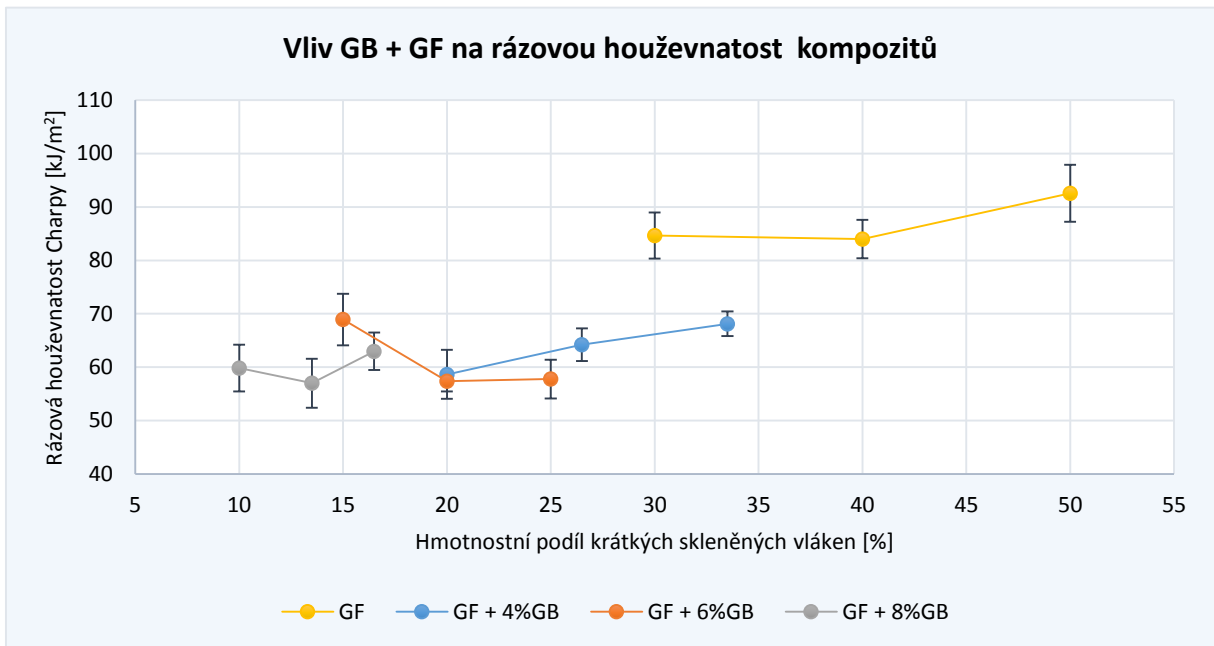
U všech naměřených hodnot rázové houževnatosti došlo k výrazným směrodatným odchylkám. „Klasické kompozity“ vyztužené pouze uhlíkovými nebo krátkými skleněnými vlákny vykazují vyšších hodnot rázové houževnatosti než hybridní kompozity vyztužené 4 %, 6 % nebo 8 % dutých skleněných kuliček a uhlíkovými nebo krátkými skleněnými vlákny (viz obr. 80 a obr. 81). Například „klasický kompozit“ vyztužený 20 % uhlíkových vláken má rázovou houževnatost 74 kJ/m<sup>2</sup>, ale přidáním 4 % nebo 6 % dutých skleněných kuliček klesne rázová houževnatost hybridního kompozitu o 27 %, resp. o 33 % (viz obr. 80). Výsledky hybridních kompozitů v tomto případě potvrzují negativní vliv dutých skleněných kuliček na rázovou houževnatost kompozitů. Hybridní kompozity vyztužené 4 %, 6 % a 8 % dutých skleněných kuliček a uhlíkovými nebo krátkými skleněnými vlákny nevykazují klesající nebo rostoucí tendenci křivek v závislosti na množství vlákenné výztuže (s ohledem na směrodatné odchylky)



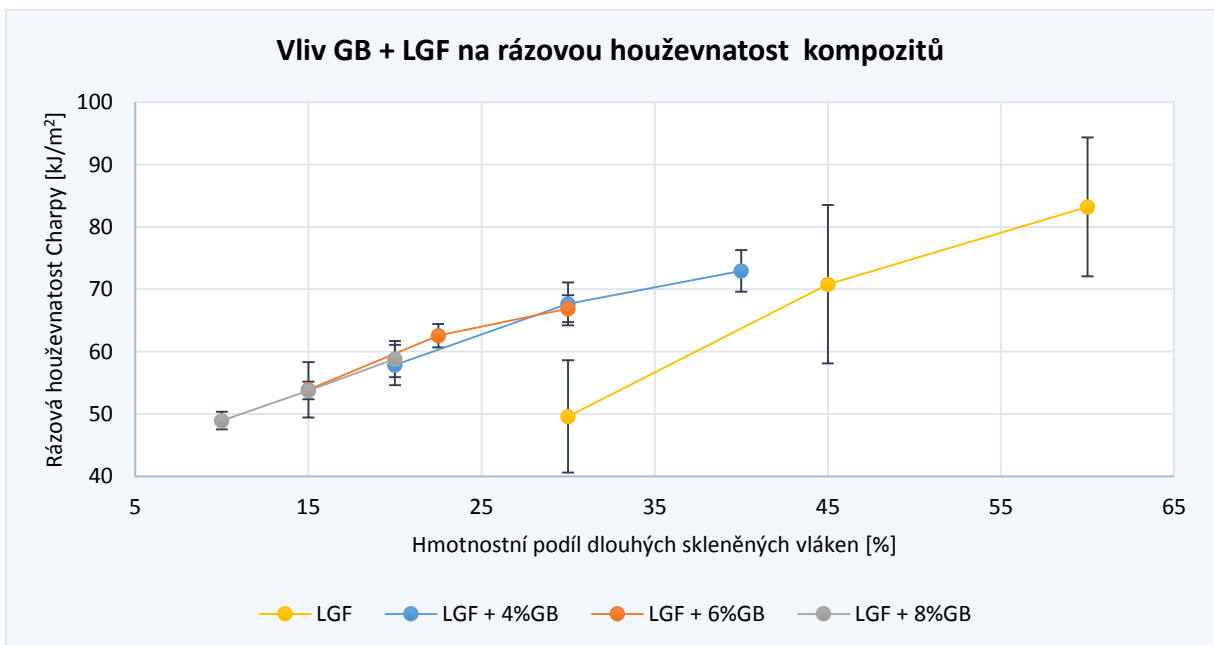
**Obr. 80** Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství dutých skleněných kuliček a uhlíkových vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Na rozdíl od předchozích případů je v případě hybridních kompozitů vyztužených dlouhými skleněnými vlákny (LGF) viditelný příznivý vliv dutých skleněných kuliček (GB) na hodnoty rázové houževnatosti kompozitu (viz obr. 82). Hybridní kompozit se 4 % GB a 30 % LGF, popřípadě 6 % GB a 30 % LGF má o 36 %, resp. o 35 % vyšší rázovou houževnatost než „klasický kompozit“ (kompozit bez dutých skleněných kuliček). Při vzájemném porovnání hybridních kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny (LGF), nemá vyšší množství dutých skleněných kuliček na hodnoty rázové houževnatosti Charpy výrazný vliv. Kompozity s dlouhými skleněnými vlákny vykazují jako jediné jednoznačnou rostoucí tendenci se zvyšujícím se množstvím vlákenné výztuže. Vysvětlení lze nalézt v rozptylu vláken v místech nárazové plochy. U dlouhvláknových kompozitů je méně napěťových špiček než u

krátkovláknových. To může být jedním z důvodů proč je u kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny dána jednoznačná závislost.



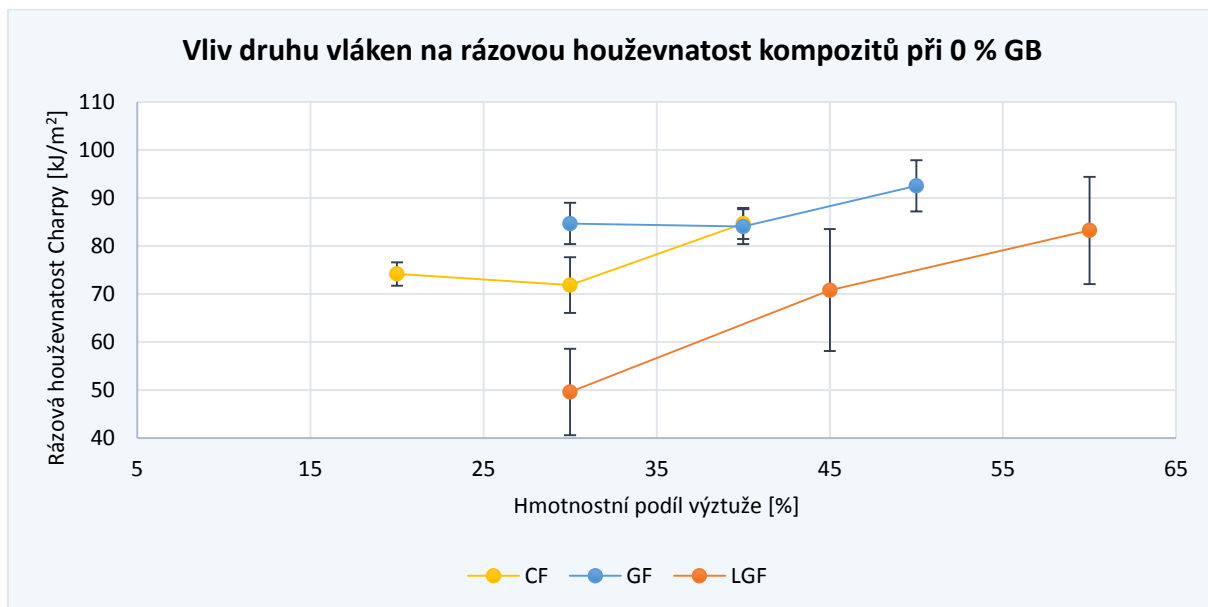
**Obr. 81** Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství dutých skleněných kuliček a krátkých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66



**Obr. 82** Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství dutých skleněných kuliček a dlouhých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

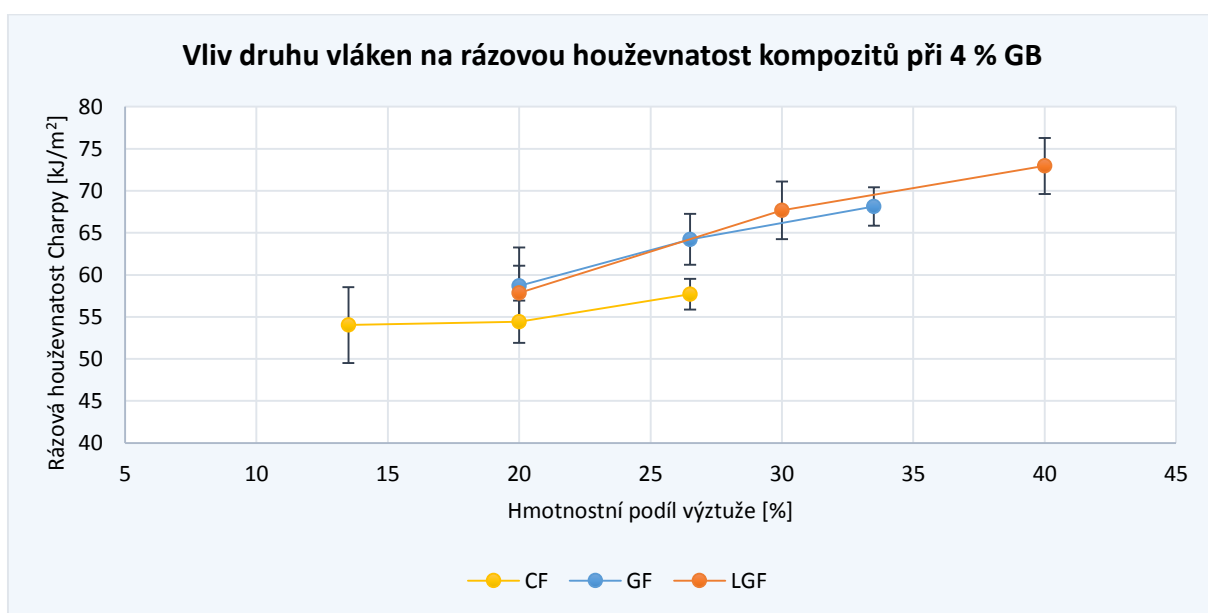
U „klasických kompozitů“ vykazují nejvyšších hodnot rázové houževnatosti Charpy kompozity vyztužené krátkými skleněnými vlákny (viz obr. 83). Naopak nejnižších hodnot dosahují kompozity s dlouhými skleněnými vlákny, které mají jako jediné viditelný nárůst rázové houževnatosti s rostoucím množstvím výtzuže. K poklesu rázové houževnatosti oproti

základní matici PA 66 dochází pravděpodobně potlačením tažnosti tvárné matrice křehkými vyztužujícími vlákny, které snižují prodloužení při přetržení matrice.



**Obr. 83** Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství a typu vláken u „klasických kompozitů“ na bázi matrice PA 66

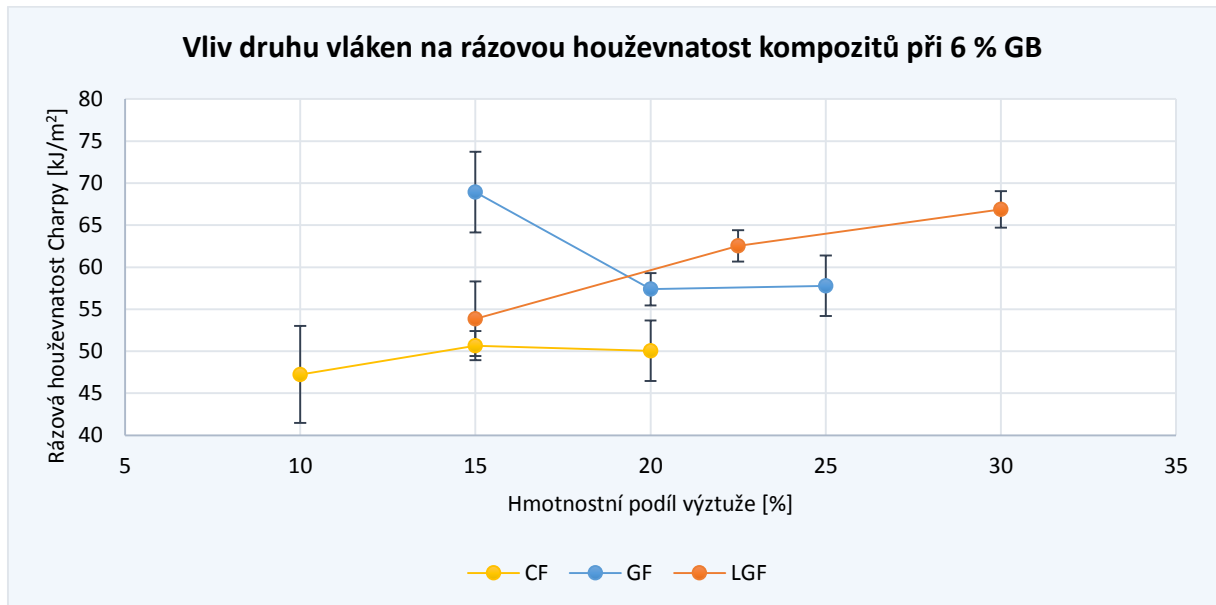
U hybridních kompozitů je průběh odlišný v porovnání s klasickými kompozity (viz obr. 84). V množství 4 % dutých skleněných kuliček mají nejnižší hodnoty rázové houževnatosti hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny. Naopak kompozity s dlouhými skleněnými vlákny vykazují podobných hodnot rázové houževnatosti jako kompozity s krátkými skleněnými vlákny. Přidáním 4 % dutých skleněných kuliček do kompozitů s LGF bylo tedy dosaženo podobných hodnot rázové houževnatosti jako u kompozitů s krátkými skleněnými vlákny.



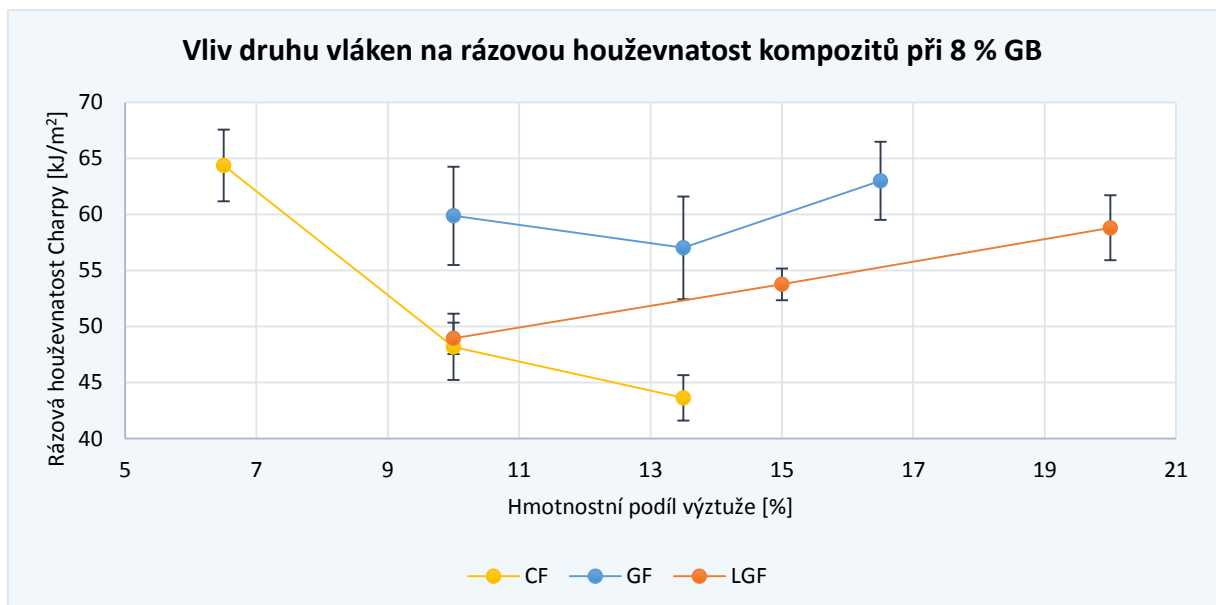
**Obr. 84** Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 4 % dutých skleněných kuliček



Hybridní kompozity v kombinaci se 6 % dutých skleněných kuliček vykazují opět výrazné odchylky (viz obr. 85). Kompozity s dlouhými skleněnými vlákny vykazují s vyšším množstvím vlákenné výztuže nejvyšších hodnot rázové houževnatosti Charpy. Hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny a 6 % dutých skleněných kuliček nevykazují rostoucí nebo klesající tendenci a s množstvím uhlíkových vláken (CF) se hodnota rázové houževnatosti téměř nemění (s ohledem na velikost směrodatných odchylek).



**Obr. 85** Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 6 % dutých skleněných kuliček



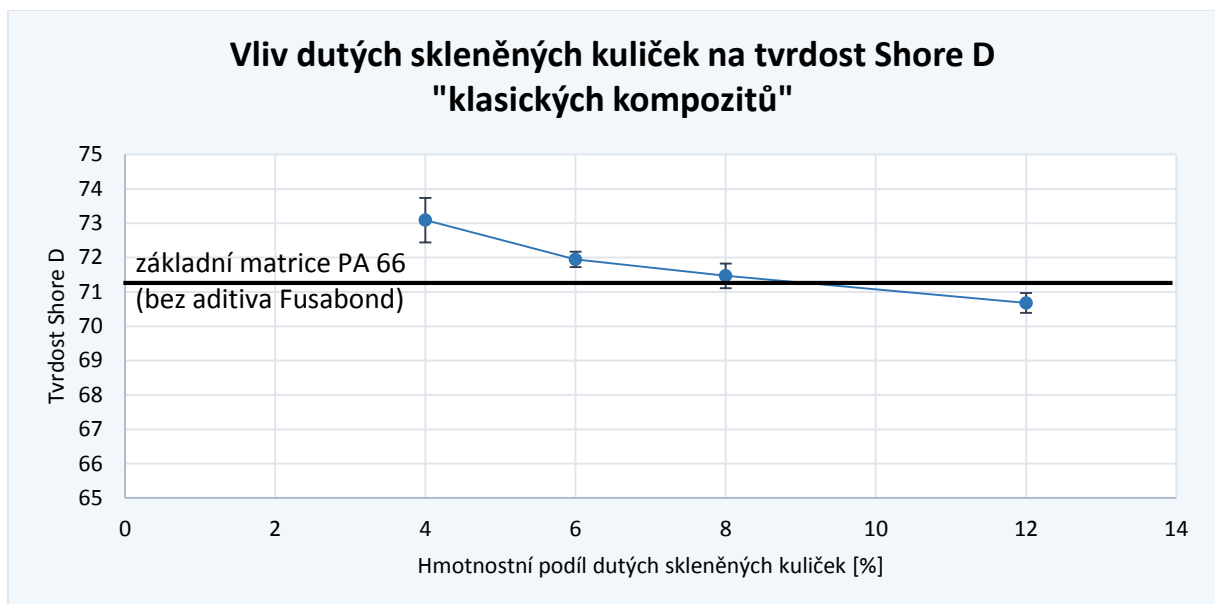
**Obr. 86** Závislost rázové houževnatosti Charpy na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 8 % dutých skleněných kuliček

V případě hybridních kompozitů s 8 % dutých skleněných kuliček dosahují nejvyšších průměrných hodnot rázové houževnatosti kompozity s krátkými skleněnými vlákny (viz obr. 86). Hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny a 8 % dutých skleněných kuliček mají

klesající tendenci s rostoucím množstvím vláken. Kompozity s LGF jako ve všech předešlých případech vykazují, opět jako jediné, viditelnou rostoucí tendenci s vyšším množstvím vláken. Je potřeba zohlednit, že hodnoty získané z experimentů vykazovaly dosti vysokých odchylek, které mohly mít za důsledek nejednoznačný vliv (růst/pokles) vláken na hodnoty rázové houževnatosti kompozitů.

#### 4.4 Zhodnocení tvrdosti hybridních kompozitů

Poslední zkoumanou vlastností byla tvrdost Shore D. Zvyšující se množství dutých skleněných kuliček v polymerní matrici PA 66 má za následek pokles tvrdosti kompozitního materiálu (viz obr. 87).

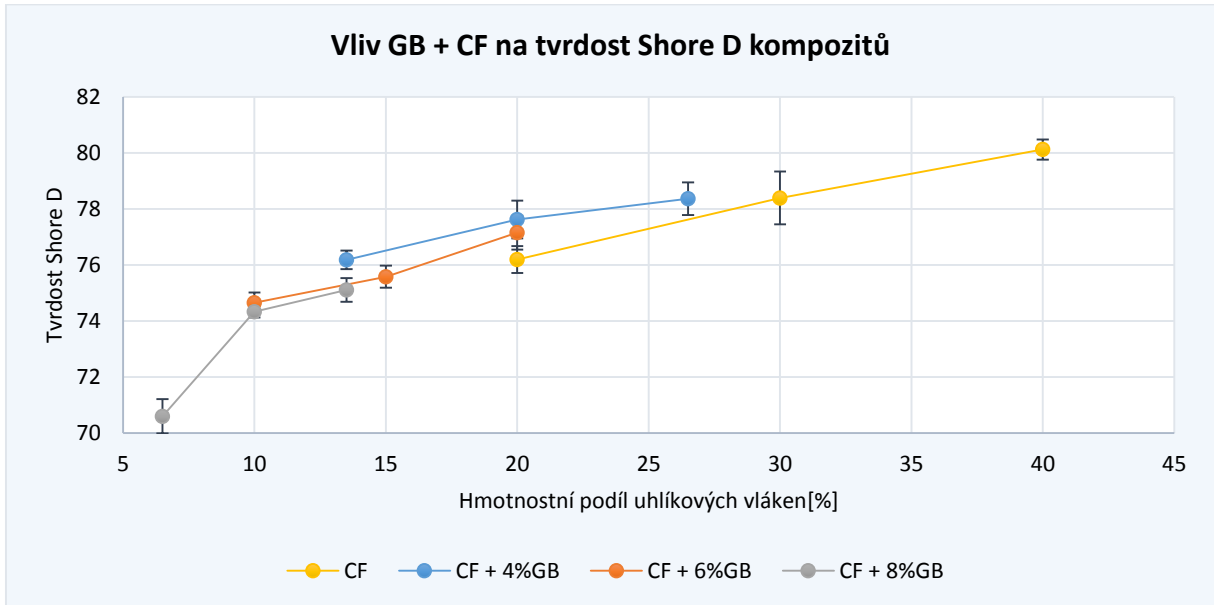


**Obr. 87** Závislost tvrdosti Shore D na podílu dutých skleněných kuliček u kompozitů na bázi PA 66

Kompozity s uhlíkovými vlákny vykazují s rostoucím množstvím dutých skleněných kuliček vyšších hodnot tvrdosti Shore D než „klasické kompozity“ (vyztužené pouze uhlíkovými vlákny). S ohledem na změnu tvrdosti s rostoucím množstvím dutých skleněných kuliček (viz obr. 87) se potvrdilo, že nejvyšších hodnot tvrdosti hybridních kompozitů s uhlíkovými vlákny dosahují hybridní kompozity se 4 % dutých skleněných kuliček. Kompozity s vyšším hmotnostním podílem dutých skleněných kuliček (vyšším než 4 %) v kombinaci s uhlíkovými vlákny vykazují mírný pokles tvrdosti oproti kompozitům s uhlíkovými vlákny a 4 % GB, ale tvrdost vykazují stále vyšší než „klasické kompozity“ bez dutých skleněných kuliček (viz obr. 88).

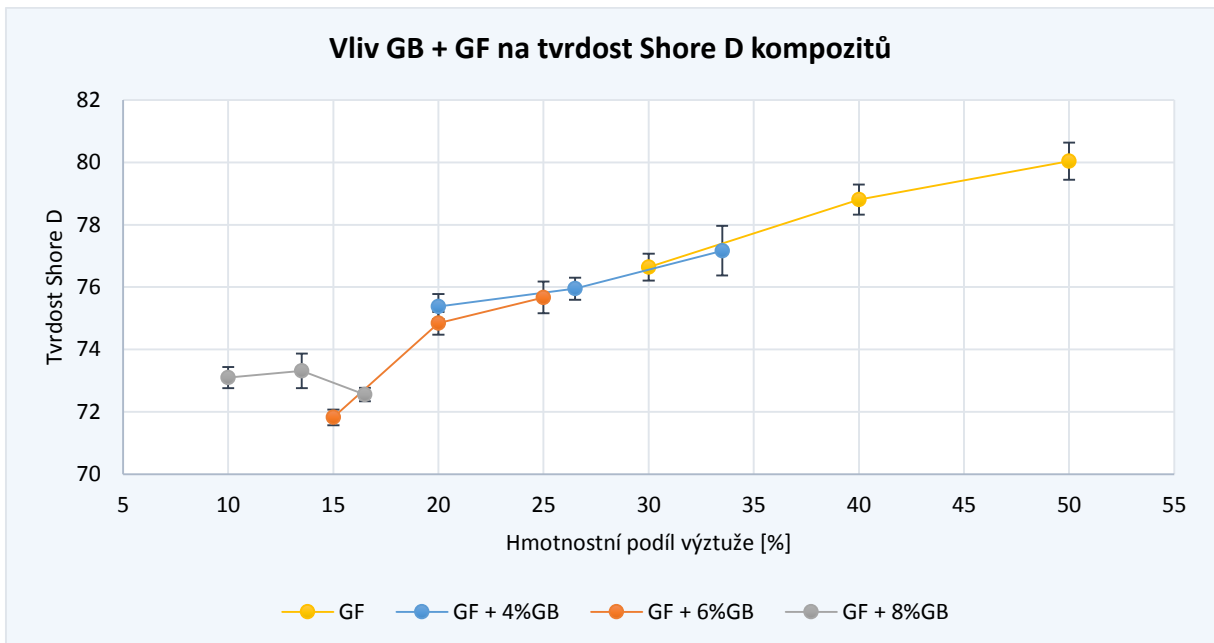
Nárůst tvrdosti Shore D je oproti „klasickým kompozitům“ minimální. Například „klasický kompozit“ s 20 % uhlíkových vláken dosahuje tvrdosti 76.2 Shore D, což je pouze o 1,2 %

méně než u kompozitu se 6 % GB a 20 % CF a téměř o 2 % méně než u kompozitu s 4 % GB a 20 % CF. Změny v hodnotách tvrdosti jsou tedy ze statistického hlediska zanedbatelné.



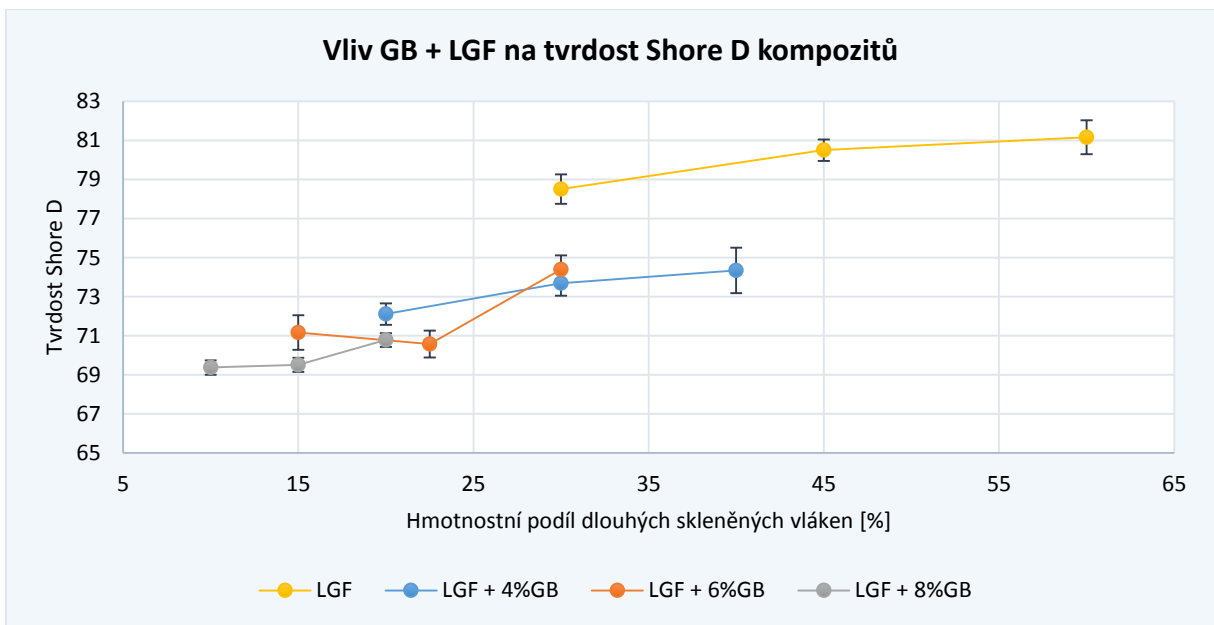
**Obr. 88** Závislost tvrdosti Shore D na množství dutých skleněných kuliček a uhlíkových vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Hybridní kompozity vyztužené krátkými skleněnými vlákny vykazují minimální změny v tvrdosti Shore D s rostoucím množstvím dutých skleněných kuliček (viz obr. 89). S vyšším množstvím dutých skleněných kuliček v kompozitu je dosaženo zanedbatelného poklesu tvrdosti (méně než 1 %) oproti klasickým kompozitům vyztužených pouze krátkými skleněnými vlákny.

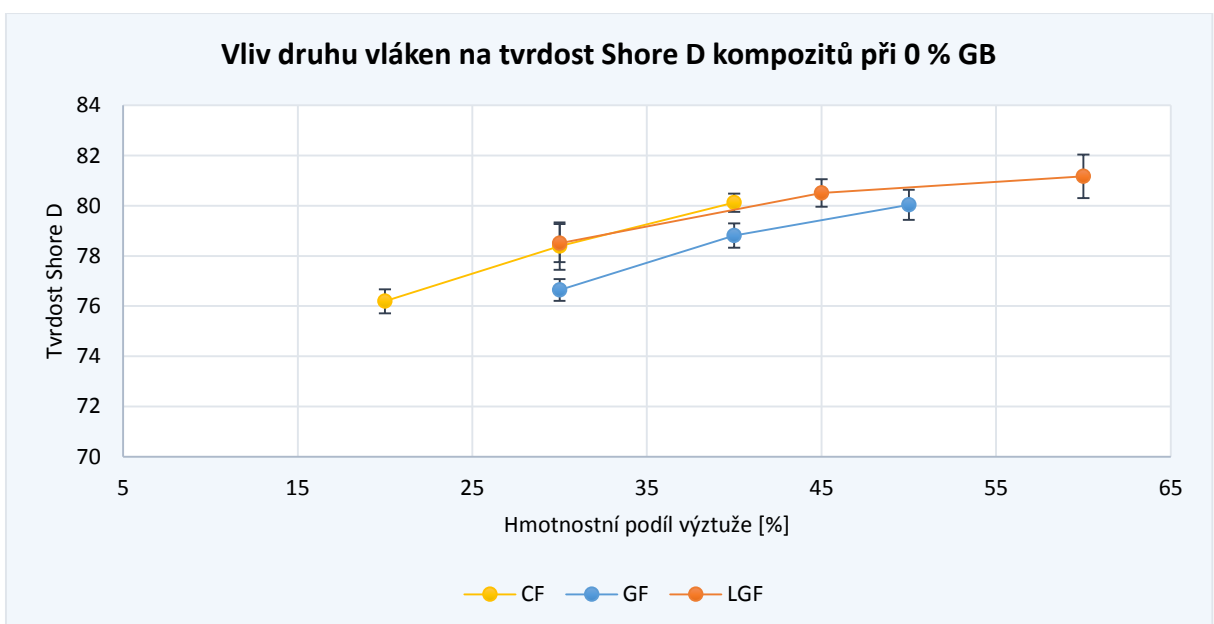


**Obr. 89** Závislost tvrdosti Shore D na množství dutých skleněných kuliček a krátkých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

Hybridní kompozity s dlouhými skleněnými vlákny vykazují nejvyšších rozdílů v tvrdosti Shore D, ale i zde jsou v komplexním pohledu (v závislosti na sledovaném množství dutých skleněných kuliček) změny zanedbatelné (viz obr. 90). Přidáním dutých skleněných kuliček do kompozitů vyztužených dlouhými skleněnými vlákny je dosaženo snížení tvrdosti Shore D v porovnání s „klasickým kompozitem“ vyztuženým pouze dlouhými skleněnými vlákny. Nejvyšší tvrdost při 30 % dlouhých skleněných vláken dosahuje „klasický kompozit“, ale přidáním 4 % nebo 6 % GB do kompozitu vyztuženého 30 % dlouhých skleněných vláken se tvrdost kompozitu sníží o 3,5 %, resp. o 4,5 %.



**Obr. 90** Závislost tvrdosti Shore D na množství dutých skleněných kuliček a dlouhých skleněných vláken u kompozitů na bázi matrice PA 66

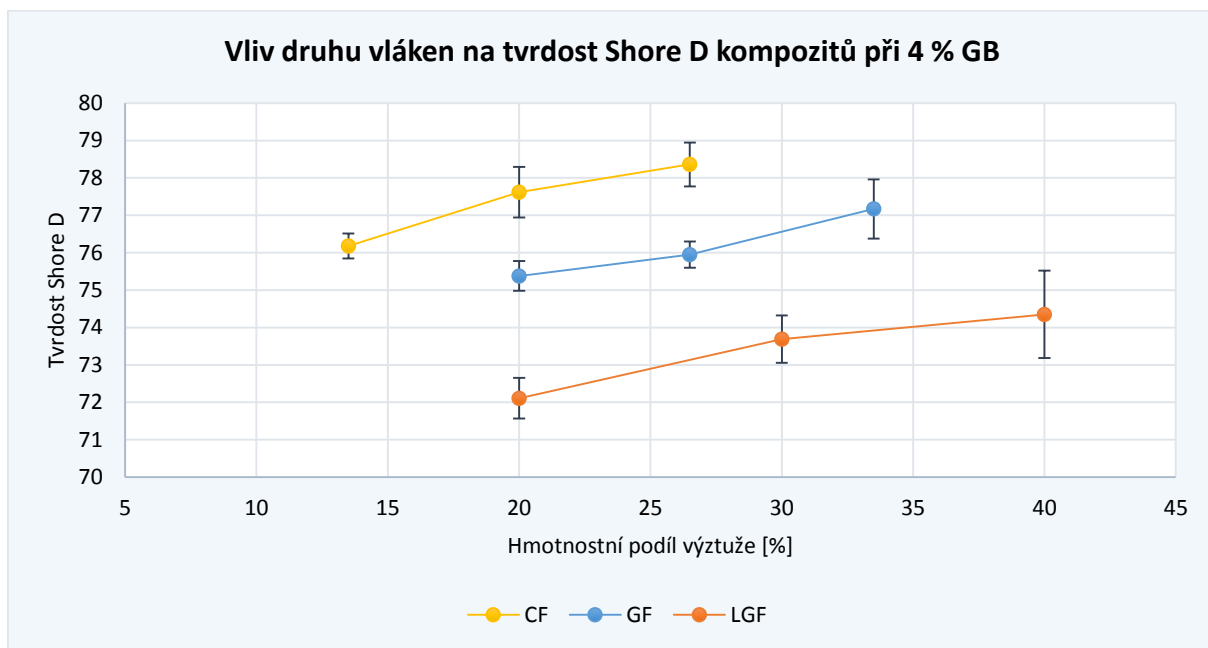


**Obr. 91** Závislost tvrdosti Shore D na množství a typu vláken u „klasických kompozitů“ na bázi matrice PA 66

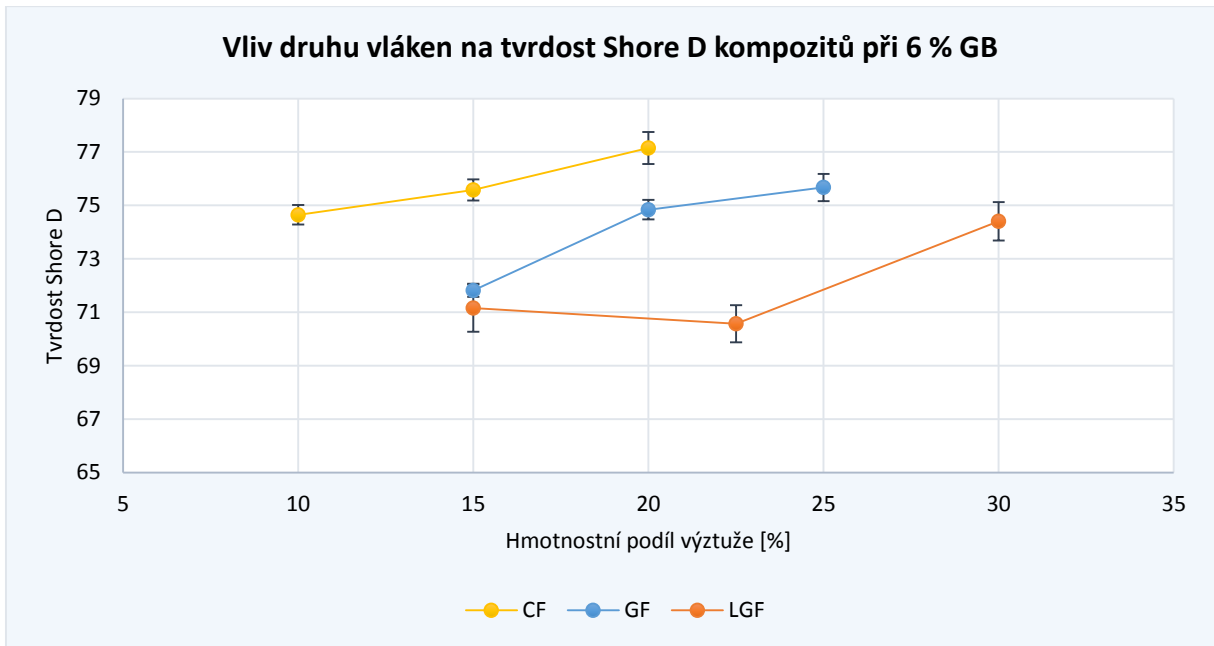
Při vyhodnocení klasických kompozitů dosahují největší tvrdosti kompozity s uhlíkovými vlákny (CF) spolu s kompozity vyztužených dlouhými skleněnými vlákny (LGF). Výraznějších změn v hodnotách tvrdosti Shore D je dosaženo až u kompozitů s krátkými skleněnými vlákny (GF), u kterých je tvrdost viditelně nejnižší (viz obr. 91). Klasické kompozity s CF a LGF při 30 % vláken vykazují minimální rozdíl v hodnotách tvrdosti Shore D (78,4; resp. 78,5), ale při 30 % krátkých skleněných vláken je tvrdost Shore D kompozitu 76,6. Nejvyššího nárůstu tvrdosti vykazuje z „klasických kompozitů“ kompozit se 40 % dlouhých skleněných vláken, jehož hodnota tvrdosti vzrostla o 12,5 % v porovnání s tvrdostí Shore D matrice PA 66.

Chování hybridních kompozitů vykazuje značné odchylky od chování „klasických kompozitů“. Nejvyšší hodnoty tvrdosti při 4 % dutých skleněných kuliček vykazují kompozity s uhlíkovými vlákny (viz obr. 92). Naopak nejnižší hodnoty tvrdosti mají kompozity s dlouhými skleněnými vlákny. Oproti hybridnímu kompozitu se 4 % GB a 20 % CF došlo ke snížení o 3,2 % v případě kompozitu s krátkými skleněnými vlákny a o 7,8 % v případě kompozitu s dlouhými skleněnými vlákny (viz obr. 92). Je nutné podotknout, že vyšší množství vláken nemělo výrazný vliv na tvrdost kompozitu a například přidáním 4 % GB a 26,5 % CF došlo ke zvýšení tvrdosti kompozitu oproti základní polymerní matrici pouze o 10 %.

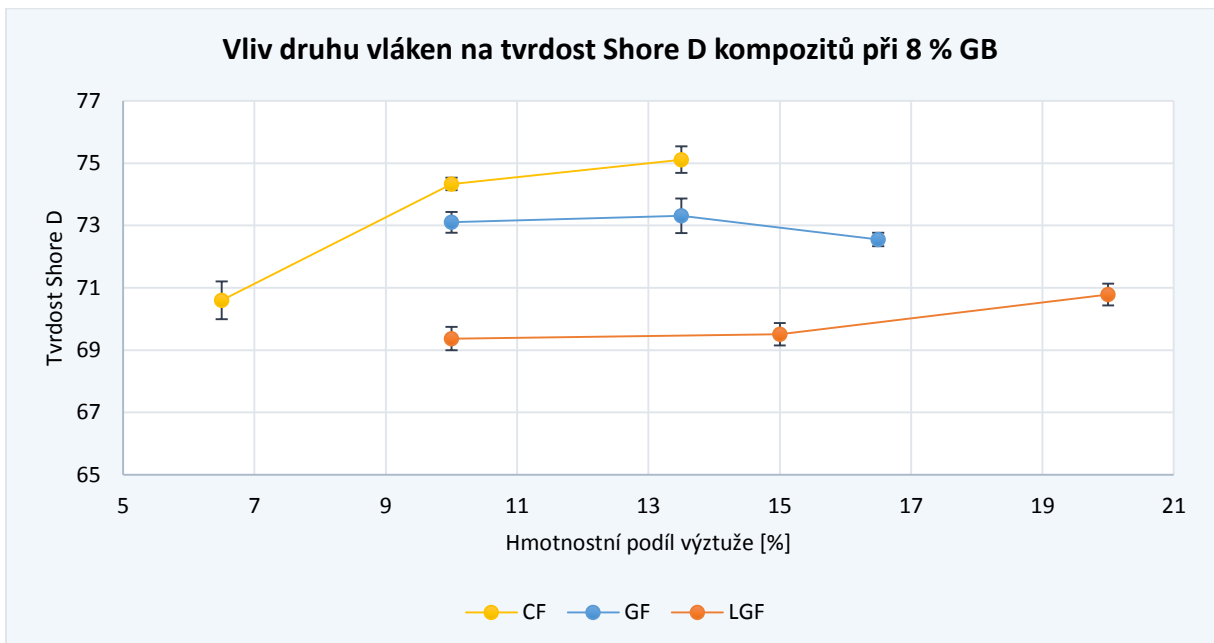
Průběh tvrdosti u hybridních kompozitů se 6 % a 8 % dutých skleněných kuliček je podobný jako v předcházejícím případě. Se zvyšujícím se množstvím výztuže roste pevnost hybridních kompozitů (viz obr. 93 a obr 94). Přehled procentuálního zvýšení hodnot tvrdosti Shore D u všech zkoumaných kombinací hybridních kompozitů (vzhledem k čisté polymerní matrici PA 66) je uveden v příloze 4 na str. P18 ÷ P19.



**Obr. 92** Závislost tvrdosti Shore D na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 4 % dutých skleněných kuliček



**Obr. 93** Závislost tvrdosti Shore D na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 6 % dutých skleněných kuliček



**Obr. 94** Závislost tvrdosti Shore D na množství a typu vláken u hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66 při 8 % dutých skleněných kuliček

## 5 Závěr

---

Cílem diplomové práce byla analýza mechanických vlastností hybridních polymerních kompozitů na bázi polyamidové matrice. Pro analýzu mechanických vlastností bylo navrženo několik sérií experimentů, lišících se druhem a množstvím plniva. Hybridní kompozity byly plněny dutými skleněnými kuličkami v poměrech 4 %, 6 % a 8 % a uhlíkovými, skleněnými krátkými nebo dlouhými vlákny v množství od 6,5 % do 40 %. Hybridní kompozity byly zhotoveny technologií vstřikování a po předepsané době kondicionace podrobeny zkouškám v tahu, ohybu, rázové houževnatosti Charpy a tvrdosti Shore D. Naměřené hodnoty jednotlivých vlastností hybridních kompozitů jsou uvedeny v příloze 3 na str. P8 ÷ P17. Pro lepší pochopení vlivu jednotlivých vyztužujících fází jsou výsledky více či méně porovnávány s „klasickými kompozity“, které byly vyztuženy buď pouze dutými skleněnými kuličkami, nebo jedním ze tří druhů vláken. Hodnoty vlastností těchto kompozitů byly získány z první fáze projektu TA04011009, jehož řešitelem je kolektiv katedry strojírenské technologie a garantem prof. Petr Lenfeld. Převzaté hodnoty jednotlivých vlastností klasických kompozitů jsou v příloze 2 na str. P5 ÷ P7.

Úvod diplomové práce byl věnován charakteristice kompozitních materiálů se zaměřením na polymerní matrice a vláknenné výztuže, popřípadě částicová plniva. Byla provedena rešerše charakteristických vlastností kompozitních složek a jejich vlivu na výsledné vlastnosti kompozitů. Po seznámení se s problematikou kompozitních materiálů byly provedeny mechanické analýzy hybridních kompozitů a na základě těchto zkoušek byly zhodnoceny vlivy daných podmínek na dosažené výsledky.

Jako první se zjišťovaly tahové charakteristiky, tedy mez pevnosti v tahu, modul pružnosti a poměrné prodloužení při přetržení. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že vyšší množství dutých skleněných kuliček (GB) nepříznivě ovlivňuje mez pevnosti v tahu hybridních kompozitů. Zároveň je nutné podotknout, že vlivem GB sice dochází ke snížení meze pevnosti v tahu, ale s ohledem na snížení hustoty kompozitu je důležitým faktorem tzv. měrná pevnost, která by u hybridních kompozitů plněných dutými skleněnými kuličkami měla být (při vyšším množství GB než u provedených experimentů) vyšší než u „klasických kompozitů“ vyztužených pouze vláknennou výztuží. Největší vliv dutých skleněných kuliček na mez pevnosti v tahu byl zaznamenán v kompozitech vyztužených uhlíkovými vlákny (CF), u kterých je pokles s vyšším množstvím dutých skleněných kuliček nejvýraznější. S rostoucím množstvím dutých skleněných kuliček došlo v porovnání s „klasickým kompozitem“ k poklesu meze pevnosti hybridního kompozitu s uhlíkovými vlákny okolo (5 ÷ 10) %. Výraznější projevy GB na hodnoty meze pevnosti v tahu byly zaznamenány i u hybridních kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny (LGF), kde se ve většině případů mez pevnosti

snížovala cca o 8 %. Nejmenší vliv dutých skleněných kuliček byl zaznamenán u kompozitů vyztužených krátkými skleněnými vlákny (GF), kde vyšší množství GB nemělo ve většině případů výrazný vliv na hodnotu meze pevnosti v tahu kompozitu (viz obr. 41). Co se týče vzájemného porovnání hybridních kompozitů vyztužených třemi druhy vláken, tak všechny vyztužené kompozity dosahovaly výrazně vyšších hodnot meze pevnosti v tahu oproti matici PA 66. Nejvyššího zlepšení dosahovaly kompozity s uhlíkovými vlákny. Hybridní kompozit se 4 % GB a 26,5 % CF zaznamenal navýšení meze pevnosti oproti čistému PA 66 o 183 %. Podobného zvýšení bylo dosaženo i u kompozitu se 4 % GB a 40 % LFG, kde mez pevnosti vzrostla o 182 %, ale s vyšším množstvím vláken a vyšší hustotou skla došlo ke zvýšení hustoty až o 18 % oproti kompozitu s uhlíkovými vlákny (viz příloha 1). Například hybridní kompozit se 4 % GB a 20 % uhlíkových vláken dosahoval navýšení meze pevnosti o 20 % v porovnání s hybridním kompozitem vyztuženým dlouhými skleněnými vlákny (LGF) a o 60 % v porovnání s hybridním kompozitem vyztuženým krátkými skleněnými vlákny (GF). Nejenže kompozit se 4 % GB a 20 % CF měl vyšší mez pevnosti, ale celková hustota kompozitu byla o 5 % nižší než u kompozitů s krátkými a dlouhými skleněnými vlákny (viz příloha 1, tab. P2). Při porovnání krátkých a dlouhých skleněných vláken dosahovaly lepších hodnot meze pevnosti kompozity s dlouhými skleněnými vlákny. Podobných rozdílů v pevnosti bylo dosaženo i u ostatních kombinací hybridních kompozitů (viz příloha 4).

Z výsledků je tedy zřejmé, že vyšší množství dutých skleněných kuliček v hybridních kompozitech způsobuje pokles meze pevnosti v tahu. Zároveň se potvrdilo, že uhlíková vlákna mají výrazný pozitivní vliv na mez pevnosti v tahu hybridního kompozitu. Na mez pevnosti v tahu kompozitu má značný vliv i volba délky vláken. V provedených experimentech se ukázalo, že dlouhá skleněná vlákna jsou s ohledem na přenos tahových napětí vhodnější volbou než vlákna krátká. Možné vysvětlení lze nalézt v uspořádání vláken v matici. Míra uspořádání dlouhých skleněných vláken v kompozitu je pravděpodobně vyšší než u kompozitů s krátkými skleněnými vlákny. Dalším možným vlivem může být přítomnost napěťových špiček na koncích vláken. V kompozitu dochází ke značné koncentraci napětí, zejména na koncích vláken, které vedou ke vzniku mikrotrhlin v matici a k následnému snížení pevnosti. U krátkovláknových kompozitů je napěťových špiček více než u dlouhovláknových kompozitů, což může vést ke snížení pevnosti kompozitu.

Další analyzovanou tahovou charakteristikou byl modul pružnosti v tahu ( $E_t$ ). Množství 4 %, 6 %, 8 % a 12 % GB mělo za následek zvýšení hodnot modulu pružnosti hybridního kompozitu cca o 35 % vzhledem k PA 66 ( $E_t = 1376$  MPa) a zároveň snížení hustoty kompozitu. Vyšší množství dutých skleněných kuliček nezpůsobilo výraznější zvýšení  $E_t$  (viz obr. 47). Zvýšení modulu pružnosti v tahu vlivem dutých skleněných kuliček bylo dosaženo i u hybridních kompozitů vyztužených uhlíkovými a krátkými skleněnými vlákny, kde došlo oproti kompozitům bez dutých skleněných kuliček k nárůstu  $E_t$  cca o 10 %, zároveň byla díky GB snížena hustota výsledných kompozitů (viz příloha 1). V kombinaci hybridních kompozitů



vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a dutými skleněnými kuličkami nebyl zaznamenán výraznější vliv GB na hodnoty modulu pružnosti (viz obr. 50). Všechny kompozity s vláknennou výztuží zaznamenaly zvýšení modulu pružnosti v ohybu oproti původní polyamidové matrici. U hybridního kompozitu se 4 % GB a 20 % uhlíkových vláken (CF) došlo oproti matrici PA 66 k nárůstu modulu pružnosti v ohybu o 683 %, u kompozitu s 20 % krátkých skleněných vláken (GF) k nárůstu o 243 % a u kompozitu s 20 % dlouhých skleněných vláken (LGF) k nárůstu o 303 %. Z pohledu použitých vláken bylo tedy dosaženo nejlepších výsledků u hybridních kompozitů s uhlíkovými vlákny. Při vzájemném porovnání kompozitů vyztužených skleněnými vlákny (GF a LGF) se opět ukázala dlouhá vlákna jako vhodnější pro přenos tahových napětí, protože kompozity s dlouhými skleněnými vlákny vykazovaly vyšších hodnot  $E_t$ , což může být způsobeno opět přítomností napěťových špiček na koncích vláken.

Poslední testovanou tahovou charakteristikou bylo poměrné prodloužení při přetržení ( $\varepsilon_b$ ). Vliv samotných dutých skleněných kuliček na poměrné prodloužení PA 66 byl výrazně negativní. Při 12 % dutých skleněných kuliček se tažnost čisté matrice snížila z hodnoty více jak 200 % na 75 % (viz tab. 9). V kombinaci s vlákny byl zaznamenán největší vliv GB na kompozity vyztužené uhlíkovými a krátkými skleněnými vlákny (viz obr. 56 a obr. 57). Hybridní kompozit s dlouhými skleněnými vlákny a dutých skleněných kuliček nevykazoval se zvyšujícím se množstvím GB viditelných změn. U všech kompozitů s vláknennou výztuží došlo zvyšováním množství vláken ke snížení poměrného prodloužení při přetržení. Nejvyšších hodnot  $\varepsilon_b$  bylo zaznamenáno u kompozitů vyztužených krátkými skleněnými vlákny. Naopak nejnižších hodnot  $\varepsilon_b$  dosahovaly kompozity s LGF. Například kompozit se 4 % GB a 26,5 % CF vykazoval poměrné prodloužení při přetržení pouhých 3,4 % a kompozit s 8 % GB a 10 % GF pouhých 17,6 %. Oproti hybridním kompozitům s uhlíkovými vlákny a dlouhými skleněnými vlákny vykazovaly hybridní kompozity s krátkými skleněnými vlákny hodnoty vyšší až o 180 % při 20 % vláken, o 350 % při 15 % vláken a až o 208 % při 10 % vláken. Kompozity s uhlíkovými vlákny vykazovaly přibližně o (20 ÷ 40) % vyšších hodnot než kompozity s LGF. Nejnižší hodnotu  $\varepsilon_b$  vykazoval hybridní kompozit se 4 % GB a 40 % LGF, která byla pouhých 2,6 %.

Ze získaných teoretických poznatků bylo potvrzeno, že krátká skleněná vlákna mají největší schopnost prodloužení (až 6 %, viz tab. 4) a tedy hybridní kompozity s GF vykazují nejvyšších poměrných prodloužení při přetržení. Nižších tažností dosahují kompozity s uhlíkovými vlákny, protože poměrné prodloužení při přetržení CF je dle literární rešerše max. 2 % (viz tab. 3). Zajímavá je závislost krátkých a dlouhých skleněných vláken. I přes skutečnost, že obě vlákna byla skleněná, tak hybridní kompozity s LGF vykazovaly nejnižších hodnot  $\varepsilon_b$ , což by mohlo být vysvětleno jiným uspořádáním dlouhých vláken v matrici.

Dalšími testovanými vlastnostmi byly ohybové charakteristiky, tj. mez pevnosti v ohybu ( $\sigma_{fM}$ ) a modul pružnosti v ohybu ( $E_f$ ). Vliv dutých skleněných kuliček na mez pevnosti v ohybu hybridních kompozitů byl víceméně negativní a vliv vláknenné výztuže výrazně pozitivní. Mez pevnosti v ohybu základní matrice PA 66 byla 63 MPa. Přidáním 20 % uhlíkových vláken se

hodnota  $\sigma_{fM}$  „klasického kompozitu“ zvýšila o 266 % ( $\sigma_{fM} = 231$  MPa). Přidání 6 % GB do kompozit s 20 % uhlíkových vláken způsobilo snížení  $\sigma_{fM}$  o 5 % ( $\sigma_{fM} = 219$  MPa) a přidáním 8 % GB do kompozit 20 % uhlíkových vláken snížení o 9 % ( $\sigma_{fM} = 210$  MPa). I přes snížení meze pevnosti v ohybu je zde podstatné snižování hustoty kompozitního systému, které může mít za následek vyšší měrnou pevnost kompozitu, která (při vyšším množství GB než u analyzovaných kompozitů) by měla být příznivější u hybridních kompozitů s dutými skleněnými kuličkami než u kompozitů vyztužených pouze vlákny. U hybridních kompozitů s LGF také docházelo k mírnému snižování meze pevnosti vlivem dutých skleněných kuliček (max. o 10 %) v porovnání s „klasickými kompozity“. Hybridní kompozity s krátkými skleněnými vlákny nevykazovaly viditelný pokles meze pevnosti s vyšším množstvím GB (viz obr. 65). Jak bylo zmíněno, všechna zkoumaná vlákna měla pozitivní vliv na hodnoty pevnosti v ohybu kompozitů. Nejlepších hodnot  $\sigma_{fM}$  bylo dosaženo u kompozitů s uhlíkovými vlákny. O něco menších zlepšení bylo dosaženo u kompozitů s LGF a nejmenších, přesto výrazných zlepšení, bylo dosaženo vyztužením kompozitu krátkými skleněnými vlákny. Hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny vykazovaly při množství 10 %, 15 %, 20 % vláken vyšších hodnot pevnosti v ohybu vůči kompozitům s LGF cca o 20 % a cca o 50 % vůči kompozitům s GF.

Podobně jako u tahových vlastností, přítomnost dutých skleněných kuliček v kompozitním systému způsobuje zvyšování modulu pružnosti v ohybu ( $E_f$ ). Přidáním 12 % dutých skleněných kuliček byla hodnota  $E_f$  základní polymerní matrice zvýšena z 1590 MPa na 2018 MPa, což činí nárůst o 27 %. Ve všech případech hybridních kompozitů mělo přidání dutých skleněných kuliček (ve sledovaném množství 4 % až 8 %) pozitivní vliv na  $E_f$  a to zvýšením cca o (5 ÷ 15) % vůči „klasickým kompozitům“ vyztužených pouze vlákny (viz obr. 73 ÷ 75). Nejvýraznějších změn, při porovnání hybridních kompozitů, dosahovaly hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny (CF), jejichž hodnoty  $E_f$  při 10 %, 15 % a 20 % vláken byly o 74 %, resp. 86 % vyšší než hodnoty kompozitů s LGF a o 79 %, resp. 130 % vyšší než u kompozitů s krátkými skleněnými vlákny (GF). Při porovnání skleněných vláken měly kompozity s LGF vyšší hodnoty modulu pružnosti v ohybu přibližně o (15 ÷ 30) % (viz obr. 76 ÷ 78).

Zjištěné teoretické poznatky byly tedy potvrzeny i v experimentálním měření. Duté skleněné kuličky snižují v hybridních kompozitech pevnost v ohybu a modul pružnosti zvyšují. Vlákna mají ve všech případech pozitivní vliv a s vyšším množstvím vláknenné výtzuže je vyšší pevnost v ohybu a vyšší modul pružnosti v ohybu, přičemž CF zvyšují ohybové charakteristiky kompozitů nejvíce. Podobně jako u tahových charakteristik jsou dlouhá skleněná vlákna (z pohledu ohybových zatížení) lepší volbou než krátká vlákna. Opět to může být způsobeno orientací vláken v matrici nebo přítomností méně napětových špiček v případě kompozitů s LGF nebo kombinace obou předpokladů.

Další studovanou veličinou byla rázová houževnatost Charpy ( $a_{cu}$ ). Rázová houževnatost PA 66 nebyla zjištěna, protože vzorek nebyl přeražen. Ze získaných hodnot

rázové houževnatosti vztahujících se na klasické kompozity, byl viditelný negativní vliv dutých skleněných kuliček na hodnoty rázové houževnatosti hybridních kompozitů. Z obr. 79 je ale patrný pokles  $a_{cU}$  s rostoucím množstvím dutých skleněných kuliček. Rozdíl v rázové houževnatosti kompozitu při 6 % a 12 % GB je 60 %. U hybridních kompozitů vyztužených uhlíkovými a krátkými skleněnými vlákny se vliv dutých skleněných kuliček potvrdil snížením  $a_{cU}$ . „Klasický kompozit“ s 20 % CF vykazoval hodnotu  $a_{cU}$  74,2 kJ/m<sup>2</sup>. Přidáním 4 % dutých skleněných kuliček došlo ke snížení rázové houževnatosti hybridního kompozitu o 27 % a přidáním 6 % dutých skleněných kuliček o 33 % (viz obr. 80). Podobných projevů dosahovaly i hybridní kompozity s krátkými skleněnými vlákny (viz obr. 81). U hybridních kompozitů s LGF bylo naopak zaznamenáno zvýšení  $a_{cU}$ . Přidáním GB do kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny (LGF) bylo dosaženo zvýšení rázové houževnatosti až o 34 % oproti klasickým kompozitům vyztužených pouze LGF. Je nutné podotknout, že u všech kompozitů bylo naměřeno vysokých směrodatných odchylek, které mohly mít významný dopad na průběh závislosti rázové houževnatosti Charpy. Co se týče vyztužujících vláken v kompozitech, tak vykazovala značných rozdílů v průběhu křivek. Z hodnot rázové houževnatosti získaných z „klasických kompozitů“ bylo zřejmé, že kompozity s krátkými skleněnými vlákny mají nejvyšší  $a_{cU}$ , naopak kompozity s LGF nejnižší. Se zvyšujícím se hmotnostním množstvím dutých skleněných kuliček vykazovaly hybridní kompozity s vlákennou výztuží pokaždé jiných vlastností. Obecně lze říci, že hybridní kompozity s krátkými skleněnými vlákny dosahovaly nejvyšší rázové houževnatosti a hybridní kompozity s uhlíkovými vlákny naopak nejnižší. Je také nutné podotknout, že ve většině testovaných případů, vykazovaly hodnoty  $a_{cU}$  vysokých odchylek, které pravděpodobně způsobily, že není úplně zřejmá klesající nebo stoupající tendence křivek. Nicméně v případech rázové houževnatosti lze usuzovat, že vyšší tažnost skleněných vláken (3 ÷ 5) % oproti uhlíkovým (max. 2%), měla za následek vyšší hodnoty rázové houževnatosti hybridních kompozitů. Výsledky poměrného prodloužení při přetržení hybridních kompozitů tedy odpovídají hodnotám rázové houževnatosti Charpy. Zatímco kompozity s GF dosahovaly nejvyšších hodnot poměrného prodloužení při přetržení a tedy nejvyšších hodnot  $a_{cU}$ , tak kompozity s CF vykazovaly menších hodnot poměrného prodloužení při přetržení, tomu tedy odpovídající nižší hodnoty  $a_{cU}$ . Při pohledu na obr. 80 ÷ 82 si lze všimnout, že hybridní kompozity s uhlíkovými a krátkými skleněnými vlákny nevykazují jednoznačných tendencí stoupání nebo klesání. Naopak u hybridních kompozitů s dlouhými skleněnými vlákny je patrný jednoznačný růst  $a_{cU}$  s vyšším množstvím vlákenné výztuže. To může být vysvětleno tím, že hodnoty  $a_{cU}$  kompozitů závisejí mimo jiné na rozptylu vláken v místě nárazové plochy. U vláken obecně dochází na jejich krajích k napětovým špičkám, kterých je u krátkovláknových kompozitů více než u dlouhovláknových. To může být jedním z důvodů, proč u kompozitů s GF není dána jednoznačná závislost a dochází k vysokému rozptylu hodnot rázové houževnatosti. Snižující se houževnatost zvýšením hmotnostního

podílu vláken lze vysvětlit potlačením tažnosti tvárné matrice křehkými vlákny, které snižují prodloužení při přetržení. Proto kompozity s GF dosahují nejvyšších hodnot  $a_{cu}$ .

Poslední zkoumanou charakteristikou byla tvrdost Shore D. Přidáním dutých skleněných kuliček do kompozitů vyztužených CF došlo k mírnému zvýšení tvrdosti (max. 4 %, viz obr. 88). U kompozitu s krátkými skleněnými vlákny nedošlo k rozpoznatelnému vlivu na hodnoty tvrdosti (viz obr. 89). Naopak u hybridních kompozitů s LGF došlo přidáním dutých skleněných kuliček k nejvýraznějšímu vlivu na hodnotu tvrdosti kompozitu (viz obr. 90). Přidáním 4 % GB do hybridního kompozitu s LGF došlo ke snížení tvrdosti téměř o 7 % oproti kompozitu vyztuženého pouze dlouhými skleněnými vlákny. Zvyšující se podíl vlákenné výztuže mělo malý vliv na tvrdost výsledného hybridního kompozitu. U všech vláken bylo dosaženo zvýšení tvrdosti oproti PA 66 max. o 10 %. Největších tvrdostí dosahovaly kompozity s uhlíkovými vlákny, kde nejvyššího zvýšení bylo zaznamenáno u hybridního kompozitu s 4 % GB a 26,5 % CF, právě o 10 %. U kompozitů s GF bylo zaznamenáno také mírného zvýšení, ale s menším nárůstem (max. 7 %). U všech zkoumaných hybridních kompozitů byly zjištěny minimální změny v hodnotách tvrdosti (v jednotkách %), proto s ohledem na statistické hledisko a směrodatné odchylky nelze přesně určit jednoznačný vliv vyztužujících fází na hodnoty tvrdosti hybridních kompozitů. Přesné procentuální zvýšení/snížení tvrdosti všech kompozitů je v příloze 4 na str. P28 ÷ P29.

Při analýze mechanických vlastností hybridních kompozitů, kde vzorky vykazovaly ve většině případech větší či menší odchylky, je nutné zdůraznit, že technologie vstřikování je velmi specifický proces a polymerní materiály jsou citlivé na jakékoliv změny. Záleží na rozložení vláken v polymerní matici, interakci a adhezi vláken v matici, vlhkosti materiálu, vlhkosti a teplotě okolního prostředí a na dalších vlivech, které mohou ovlivnit výsledky analýz.

Co je tedy výsledkem provedených experimentů? Při zkoumání se potvrdilo, že množství a typ plniva má vliv na mechanické vlastnosti. V případě hybridních kompozitů měly duté skleněné kuličky v kombinaci s CF, GF nebo LGF rozdílný vliv na výsledné mechanické vlastnosti, jako například v případě tvrdosti Shore, kde v kombinaci s různými druhy vláken došlo k nárůstu i poklesu tvrdosti kompozitního systému. Potvrdilo se, že duté skleněné kuličky snižují pevnost, poměrné prodloužení při přetržení a rázovou houževnatost Charpy. Naopak mají pozitivní vliv na hustotu (tedy i na měrné veličiny jako je pevnost v tahu a ohybu), moduly pružnosti a to jak v tahu, tak i v ohybu. Co se týče vláken, tak kromě rázové houževnatosti, poměrného prodloužení při přetržení a hustoty měla více či méně pozitivní vliv na všechny ostatní měřené charakteristiky. V souvislosti s rázovou houževnatostí byla zjištěna i návaznost na poměrné prodloužení při přetržení vláken, kde kompozity vyztužené vlákny s vyšší tažností, dosahovaly vyšších hodnot rázové houževnatosti. Důležitým přínosem bylo i zjištění pozitivního vlivu větší délky vlákna na ohybové a tahové charakteristiky kompozitního systému.

S výhledem na další pokračování by mohlo být zajímavé zkoumání vlivu většího hmotnostního podílu vláken a GB na mechanické hodnoty kompozitů. Také by bylo vhodné

hledání dalších souvislostí mezi krátkými a dlouhými vlákny, třeba i v případě uhlíkových vláken, zjištění uspořádání plniva v matrici apod. V případě tohoto experimentu by bylo možné provedení zkoušek na více vzorcích pro snížení rozptylu měřených hodnot a tím zpřesnění naměřených dat, která v případě rázové houževnatosti vykazovala vysokých odlišností.

## Seznam použité literatury

---

- [1] CHAWLA, K. K. *Composite materials: science and engineering*. 3rd edition. New York: Springer, 2012. 542 pages. ISBN 978-0-387-74364-6.
- [2] MERCIER, J. P., ZAMBELLI, G., KURZ, WILFRIED. *Introduction to materials science*. Paris: Elsevier, 2002. 460 pages. ISBN 2-84299-286-5.
- [3] SMRČKOVÁ, M. *Hybridní kompozit kombinující krátká houževnatá vlákna a částicové plnivo v polymerní matici*: diplomová práce. Brno: VÚT Fakulta chemická, 2011. 52 s.
- [4] PRABHURAM, T., SOMURAJAN, V., PRABHAKARAN, S. Hybrid composites materials. *Frontiers in automotive and mechanical engineering (FAME)*. 2010, pp. 27-31. ISBN 978-1-4244-9081-3.
- [5] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [6] BAREŠ, R. A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 328 s. ISBN 04-734-88.
- [7] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. 296 s. ISBN 04-217-87.
- [8] MEISSNER, B., ZILVAR, V. *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 308 s.
- [9] *Vlastnosti kompozitních materiálů*. [online]. [cit. 2015-3-14]. Dostupné na: <http://www.wallmocz.cz/data/vlastnosti.pdf>
- [10] YALCIN, B. Polymer composites with hollow glass microspheres: processing, properties and applications. [online]. [cit. 2015-2-3]. Dostupné na: <http://li1.workcast.net/10416/6837218870151564/Documents/Baris%20presentation%20slides.pdf>
- [11] CAMPBELL, F. C. *Structural composite materials*. 1st edition. USA: ASM International, 2010. 629 pages. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [12] HARRIS, B. *Engineering composite materials*. 2<sup>nd</sup> edition. London: The institute of materials, 1999. 317 pages. ISBN 000-1861250320.
- [13] JONES, R. M. *Mechanics of composite materials*. 2<sup>nd</sup> edition. London: CRC Press, 1998. 538 pages. ISBN 1-56032-712-X.
- [14] THOMAS, S., JOSEPH, K., MALHOTRA, S.K. at al. *Polymer composites: macro- and microcomposites*. Germany: Wiley-VCH, 2013. 727 pages. ISBN 978-3-527-32624-2.
- [15] HORSKÁ, P. *Příprava polymerních kompozitů - skleněné vlákno/polyesterová pryskyřice*: bakalářská práce. Brno: VÚT Fakulta chemická, 2009. 40 s.
- [16] FU, S. Y., LAUKE, B., MAI, Y. W. *Science and engineering of short fibre reinforced polymer composites*. Cambridge: Woodhead publishing, Ltd., 2009. 364 pages. ISBN 978-1-84569-649-8.
- [17] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály: modely a vlastnosti*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. 55 s. ISBN 80-7083-972-4.
- [18] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály: druhy a jejich použití*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 113 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [19] MALLICK, P.K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. 3rd edition. USA: CRC Press, 2007. 638 pages. ISBN 978-0-8493-4205-9.



- [20] STRONG, B. A. *Fundamentals of composites manufacturing, second edition: materials, methods and applications*. USA: Society of manufacturing engineers, 2008. 620 pages. ISBN 978-087263854-9.
- [21] SCHWARTZ, M. *Smart materials*. USA: CRC Press, 2009. 554 pages. ISBN 978-1-4200-4372-3.
- [22] HULL, D., CLYNE, T. W. *An introduction to composite materials*. 2nd edition. Cambridge: Press syndicate, 1996. 326 pages. ISBN 0-521-38855-4.
- [23] JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J. *Perspektivní materiály*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 2008. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [24] CHUNG, D. D. L. *Composite materials: science and applications*. 2nd edition. London: Springer, 2010. 349 pages. ISBN 978-1848828308.
- [25] HRUDŇÁK, M. *Materiálové charakteristiky a struktura kompozitních materiálů pro male sportovní letouny*: diplomová práce. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, 2004. 86 s.
- [26] *Kompozitní materiály*. [online]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství. [cit. 2015-3-20]. Dostupný na: <http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/>
- [27] FOLKES, M. J. *Short fibre reinforced thermoplastics*. England: Research studies press, 1982. 176 pages. ISBN 0-471-10209-1.
- [28] MATTHEWS, F.L., RAWLINGS, R.D. *Composite materials: Engineering and science*. 1st. edition. Cambridge: Woodhead publishing, 1999. Ltd. 480 pages. ISBN 978-1-85573-473-9.
- [29] VRBKA, J. *Mechanika kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, 2008. 94 s.
- [30] HEARLE, J. W. S. *High-performance fibres*. Cambridge: Woodhead publishing, Ltd. 344 pages. ISBN 978-1-85573-539-2.
- [31] MUKHERJEE, M., DAS, C. K., KHARITONOV, A. P. Fluorinated and oxyfluorinated short kevlar fiber-reinforced ethylene propylene polymer. *Polymer Composites*. 2006, vol. 27, issue 2, pp. 205–212.
- [32] SMITH UREN GROUP [obrázek]. [online]. [cit. 2015-3-28]. Dostupné na: [http://smithuren.com/portfolio\\_item/industrial-textiles/](http://smithuren.com/portfolio_item/industrial-textiles/)
- [33] GALASSO, F. S. *Advanced fibers and composites*. 1<sup>st</sup> edition. New York: Gordon and Breach science publishers. 176 pages. ISBN 2-88124-320-7.
- [34] *Twaron—a versatile high-performance fibre*. Teijin Aramid. [online]. 2012. [cit. 2015–9-5]. Dostupné na: [http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2012/02/1090308\\_-\\_Twaron-productbrochurefinal\\_051.pdf](http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2012/02/1090308_-_Twaron-productbrochurefinal_051.pdf).
- [35] ZOLTEK [obrázek]. [online]. [cit. 2015-28-3]. Dostupné na: <http://www.zoltek.com/products/panex-35/>
- [36] CHUNG, D. *Carbon fibres composites. 1st edition*. Newton: Butterworth-Heinemann, 1994. 215 pages. ISBN 978-0750691697.
- [37] FASERVERBUNDWERKSTOFFE [obrázek]. [online]. [cit. 2015-3-28]. Dostupné na: <http://shop1.r-q.de/item/205110>
- [38] ROTHON, R. N. *Particulate filler for polymers: volume 12*. U.K: Smithers Rapra Press. 2001. 154 pages. ISBN 978-1859573105.
- [39] *3M skleněné mikrokuličky pro auto. průmysl*. [online]. [cit. 2015-3-13]. Dostupné na: <http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1195486047000>

[&locale=cs\\_CZ&assetType=MMM\\_Image&assetId=1180593477592&blobAttribute=ImageFile](#)

- [40] WOOD, K. Microspheres: Fillers filled with possibilities. *Composite technology*. 2008, vol. 6, issue 4.
- [41] ARUNIT, A., KERS, J., MAJAK, J. et al. Influence hollow glass microspheres on the mechanical and physical properties and cost of particle reinforced polymer composites. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2012, vol. 61, issue 3, pp. 160 – 165. ISSN 1736-7530.
- [42] TROFIMOV, A., PLESHKOV, L. Hollow glass microspheres for high strength composite cores. *Reinforced plastics*. 2006, vol. 50, issue 7, pp. 44 – 46, 48 -50.
- [43] FRIEDRICH, K., FAKIROV, S., ZHANG, Z. *Polymer composites: from nano- to macro-scale*. New York: Springer, 2005. 368 pages. ISBN 0-387-24176-0.
- [44] VASILIEV, V. V., MOROZOV, E. V. *Advanced mechanics of composite materials and structural elements*. 3rd. edition. Great Britain: Elsevier, 2013. 832 pages. ISBN 978-0-08-098231-1.
- [45] THOMAS, S., POTHAN, L. A. *Natural fibre reinforced polymer composites: from macro to nanoscale*. 1<sup>st</sup> edition. Philadelphia: Old City Publishing, Inc., 2009. 539 pages. ISBN 978-1-933153-09-4.
- [46] FREGER, G. E., KESTELMAN, V. N., FREGER, D. G. *Spirally anisotropic composites*. German: Springer, 2004. 310 pages. ISBN 3-504-21188-8.
- [47] HARRIS, B. *Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*, 1<sup>st</sup> edition. Cambridge: Woodhead publishing, Ltd., 2003. 742 pages. ISBN 1-85573-608-X.
- [48] FU, S-Y., LAUKE, B. Characterization of tension behaviour of hybrid short glass fibre/calcite particle/ABS composites. *Composites: Part A*. 1988, 29A, pp. 575-583.
- [49] RENARD, J., BUNSELL, A. R. *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. UK: CRS Press, 2005. 225 pages. ISBN 0-7503-0689-0.
- [50] GDP Koral Composites. *Kompozity vyztužené plasty*. [online]. [cit. 2015-4-4]. Dostupné na: <http://www.gdpkoral.cz/>
- [51] JOON, P. *Bioceramics: properties, characterizations and applications*. New York Springer, 2009. 363 pages. ISBN 978-0-387-09544-8.
- [52] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. Svitavy: SOU Svitavy, 2014. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [53] RYBNÍKÁŘ, F., DITRYCH, Z., KLÁČEL, Z. aj. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s. ISBN 04-628-65.
- [54] GLASSCOCK, D., ATOLINO W., KOZIELSKI, G. at al. High performance polyamides fulfil demanding requirements for automotive thermal management components. *DuPont Engineering Polymers* [online]. 2008 [cit. 2015-3-25]. Dostupné na: [http://www2.dupont.com/Automotive/en\\_US/assets/downloads/knowledge%20center/Automotive\\_PPA\\_White\\_Sheet\\_07\\_09\\_2008.pdf](http://www2.dupont.com/Automotive/en_US/assets/downloads/knowledge%20center/Automotive_PPA_White_Sheet_07_09_2008.pdf)
- [55] PAGE, I. B. *Polyamides as engineering thermoplastic materials*. U.K: Smithers Rapra Press. 2000.144 pages. ISBN 978-1859572207.
- [56] BRYDSON, J. A. *Plastics materials*. 7<sup>th</sup> edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. 920 pages. ISBN 0-7506-4132-0.
- [57] PARTHASARATHY, K., LEYLAND, A., SUBRAMANIAN, S. J. at al. *Materials and manufacturing for automotive industry*, lecture 17. Department of engineering design. [online]. [cit. 2015-3-25]. Dostupné na: [http://ed.iitm.ac.in/~shankar\\_sj/Courses/ED5312/ED5312.html](http://ed.iitm.ac.in/~shankar_sj/Courses/ED5312/ED5312.html)



- [58] TRUBSHAW, R. N., ZIMMERMANN, W. *Diverse properties make polyamides essential for demanding applications in mass transit*. Polymers: An emerging force in mass transit. Birmingham: Rapra technology, Ltd., 1993. 56 pages. ISBN 978-1-85957-003-6.
- [59] BIRON, M. *Thermoplastics and thermoplastics composites*. 1<sup>st</sup> edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. 944 pages. ISBN 978-85617-478-7.
- [60] ČSN EN ISO 1874-2. *Plasty – Polyamidy (PA) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [61] ČSN EN ISO 1110. *Plasty – Polyamidy – Zrychlené kondicionování zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [62] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [63] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [64] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [65] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [66] ČSN EN ISO 2818. *Plasty – Příprava zkušebních těles obráběním*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998.
- [67] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [68] ČSN EN ISO 1183-1. *Plasty – Metody stanovení hustoty nelehčených plastů – Část 1: Imerzní metoda, metoda kapalinovým pyknometrem a titrační metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013

# Seznam příloh

---

- Příloha č. 1: Stanovení hustoty hybridních kompozitů
- Příloha č. 2: Hodnoty jednotlivých vlastností „klasických kompozitů“ (první fáze projektu TAČR)
- Příloha č. 3: Hodnoty jednotlivých vlastností hybridních kompozitů
- Příloha č. 4: Procentuální vyhodnocení jednotlivých vlastností hybridních kompozitů vůči matici PA 66
- Příloha č. 5: Materiálový list PA 66

## Příloha 1: Stanovení hustoty hybridních kompozitů

Ke zjištění hustoty měřených vzorků byla použita imerzní metoda dle ČSN EN ISO 1183-1 [68]. Tato metoda využívá měření hmotnosti vzorku na vzduchu a v imerzní kapalině, která je nalita v kádince na podstavci analytických vah AND GF 300 se speciální konstrukcí (viz obr. P1). V tomto případě imerzní kapalinou byl methanol s hustotou  $0,790 \text{ g/cm}^3$  při teplotě  $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ . Nejdříve byl zkušební vzorek o hmotnosti větší než 1g umístěn na horní misce vahadla a následně zvážen na vzduchu. Poté se vzorek umístěný na spodní misce vahadla zvážil v imerzní kapalině. Naměřené hodnoty byly zapsány a stejný postup proveden na dalších čtyřech vzorcích, ze kterých byla vypočtena hustota dle rovnice (3) a určena průměrná hustota dané kombinace kompozitu. Naměřené hustoty všech kombinací jsou v tab. P1 spolu s grafickým vyjádřením (viz obr. P2). Jako vždy jsou přiloženy hodnoty klasických kompozitů (viz tab. P2 a obr. P3).



**Obr. P1** Analytické váhy AND GF 300 spolu se speciální konstrukcí

$$\rho_{VZ} = \frac{m_{vv} \cdot \rho_{ik}}{m_{vv} - m_{vik}} \quad (3)$$

kde je:

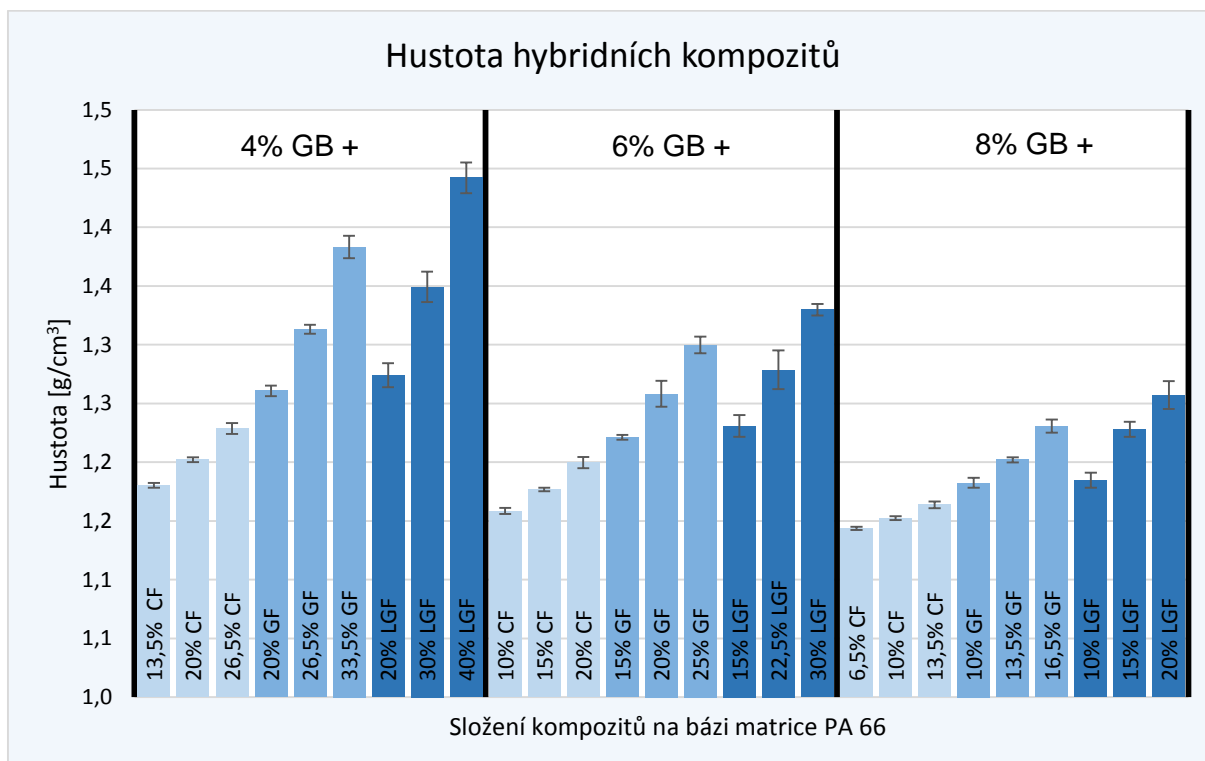
$\rho_{VZ}$	hustota měřeného vzorku	$[\text{g/cm}^3]$ ,
$\rho_{ik}$	hustota imerzní kapaliny	$[\text{g/cm}^3]$ ,
$m_{vv}$	hmotnost vzorku na vzduchu	$[\text{g}]$ ,
$m_{vik}$	hmotnost vzorku v imerzní kapalině	$[\text{g}]$ .

**Tab. P1** Hustota hybridních kompozitů v závislosti na druhu a množství výztuže

Výztuž	$\rho$ $[\text{g/cm}^3]$	Výztuž	$\rho$ $[\text{g/cm}^3]$
4%GB + 13,5%CF	$1,180 \pm 0,002$	6%GB + 20%GF	$1,258 \pm 0,011$
4%GB + 20%CF	$1,202 \pm 0,002$	6%GB + 22,5%LGF	$1,279 \pm 0,017$
4%GB + 20%GF	$1,261 \pm 0,005$	6%GB + 25%GF	$1,300 \pm 0,007$
4%GB + 20%LGF	$1,274 \pm 0,010$	6%GB + 30%LGF	$1,330 \pm 0,005$
4%GB + 26,5%CF	$1,229 \pm 0,005$	8%GB + 6,5%CF	$1,144 \pm 0,001$
4%GB + 26,5%GF	$1,313 \pm 0,004$	8%GB + 10%CF	$1,152 \pm 0,002$
4%GB + 30%LGF	$1,349 \pm 0,013$	8%GB + 10%GF	$1,182 \pm 0,004$
4%GB + 33,5%GF	$1,383 \pm 0,010$	8%GB + 10%LGF	$1,185 \pm 0,006$
4%GB + 40%LGF	$1,442 \pm 0,013$	8%GB + 13,5%CF	$1,164 \pm 0,003$
6%GB + 10%CF	$1,159 \pm 0,003$	8%GB + 13,5%GF	$1,202 \pm 0,002$

**Tab. P2** Hustota hybridních kompozitů v závislosti na druhu a množství výztuže - pokračování

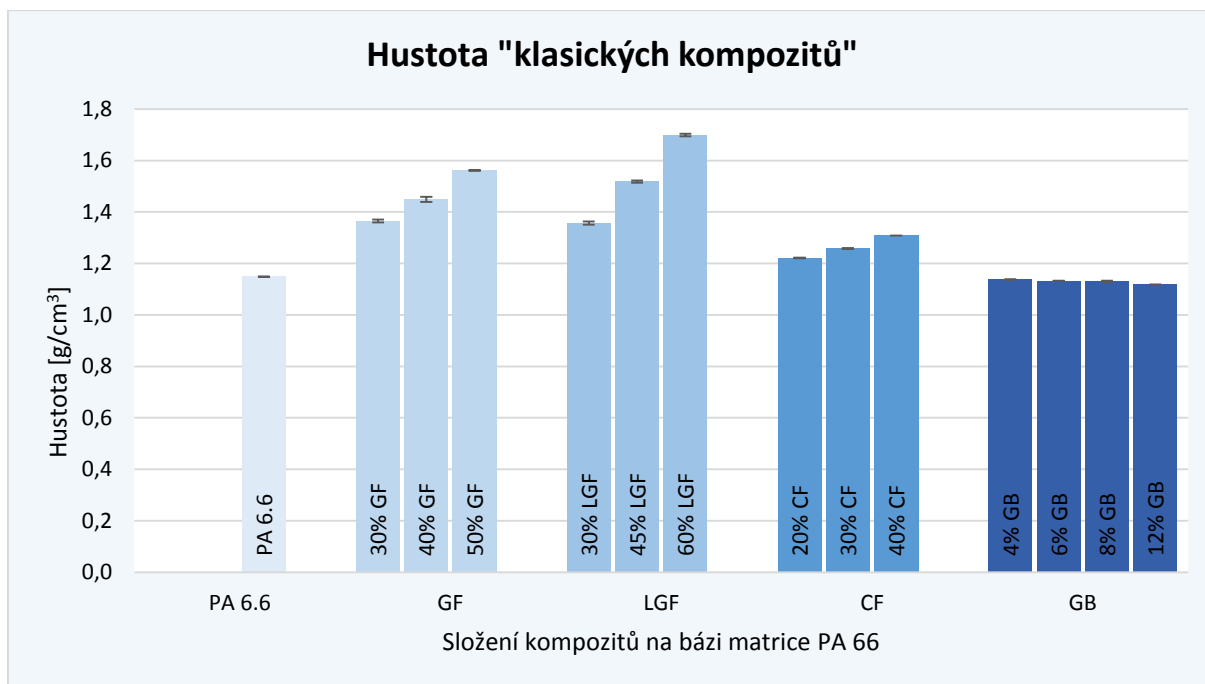
Výztuž	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Výztuž	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
6%GB + 15%CF	1,177 ± 0,001	8%GB + 15%LGF	1,228 ± 0,006
6%GB + 15%GF	1,221 ± 0,002	8%GB + 16,5%GF	1,231 ± 0,006
6%GB + 15%LGF	1,231 ± 0,009	8%GB + 20%LGF	1,257 ± 0,012
6%GB + 20%CF	1,200 ± 0,005		



**Obr. P2** Vliv přidávaných vyztužujících fází na hustotu hybridních kompozitů

**Tab. P3** Hustota „klasických kompozitů“ v závislosti na druhu a množství výztuže

Výztuž	Matrice	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
PA 66	Technyl A 218 Black 21N	1,149 ± 0,001
PA 66	30% GF	1,365 ± 0,005
	40% GF	1,449 ± 0,010
	50% GF	1,562 ± 0,002
PA 66	30% LGF	1,357 ± 0,006
	45% LGF	1,518 ± 0,005
	60% LGF	1,699 ± 0,005
PA 66	20% CF	1,222 ± 0,001
	30% CF	1,259 ± 0,002
	40% CF	1,309 ± 0,000
PA 66	4% GB	1,137 ± 0,001
	6% GB	1,133 ± 0,001
	8% GB	1,130 ± 0,003
	12% GB	1,118 ± 0,000



**Obr. P3** Vliv přidaných vyztužujících fází na hustotu „klasických kompozitů“

## Příloha č. 2: Hodnoty jednotlivých vlastností „klasických kompozitů“ na bázi matrice 66 (první fáze projektu TAČR)

**Tab. P4** Hodnoty meze pevnosti v tahu „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A 218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A218 Black 21N			
1	55,4	114,1	140,8	167,8	129,6	164,7	186,2	139,9	176,1	213,2	61,1	52,8	54,6	50,2
2	54,9	113,4	141,3	174,9	131,1	173,2	190,7	140,4	176,9	217,2	61,4	58,4	54,3	49,8
3	54,9	113,9	141,6	174,5	131,5	164,0	192,1	139,3	177,4	223,3	59,9	58,4	54,3	49,6
4	54,7	113,1	141,8	169,9	138,1	172,3	188,3	137,6	176,2	205,9	61,1	58,2	54,7	50,0
5	55,0	113,9	142,3	169,5	143,1	170,3	202,6	149,9	172,8	218,3	59,8	57,8	54,9	49,9
$\mu$	<b>55,0</b>	<b>113,7</b>	<b>141,6</b>	<b>171,3</b>	<b>134,7</b>	<b>168,9</b>	<b>192,0</b>	<b>141,4</b>	<b>175,9</b>	<b>215,6</b>	<b>60,7</b>	<b>57,1</b>	<b>54,6</b>	<b>49,9</b>
$\sigma_R$	0,2	0,4	0,5	2,9	5,1	3,8	5,7	4,3	1,6	5,8	0,7	2,2	0,2	0,2

**Tab. P5** Hodnoty modulu pružnosti v tahu „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A 218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A218 Black 21N			
1	1349	6436	9340	11818	7613	11564	16229	9561	13418	18735	1795	1917	1871	1858
2	1353	6261	8941	12037	7660	11152	16433	9556	14121	17836	1926	1843	1858	1823
3	1390	6526	9093	12274	7187	12001	16811	9426	14029	17724	1822	1957	1900	1800
4	1343	6555	8970	12637	7096	10961	15556	10181	13426	19962	1876	1937	1916	1806
5	1387	6496	8991	11969	7740	11523	16656	9469	14239	19795	1840	1875	1860	1872
6	1437	6413	8817	12145	7729	11535	17475	9349	14339	19063	1902	1846	1860	1843
$\mu$	<b>1376</b>	<b>6448</b>	<b>9025</b>	<b>12147</b>	<b>7504</b>	<b>11456</b>	<b>16527</b>	<b>9590</b>	<b>13929</b>	<b>18853</b>	<b>1860</b>	<b>1896</b>	<b>1878</b>	<b>1834</b>
$\sigma_R$	33	97	162	261	261	331	583	274	371	865	46	44	22	26

**Tab. P6** Hodnoty poměrného prodloužení při přetržení „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A 218 Black 21N			
1	více jak 200 %	8,8	5,7	4,3	2,9	2,5	1,6	5,7	3,8	2,8	76,7	57,4	98,4	76,1
2		8,1	5,6	4,3	3,1	2,5	1,8	5,5	3,9	3,0	69,3	86,6	64,4	79,5
3		9,4	6,0	3,6	3,0	2,6	1,8	5,1	3,8	2,9	58,4	75,0	77,0	69,1
4		9,6	5,8	4,2	2,9	2,5	1,7	5,5	3,6	2,3	80,4	87,4	72,3	88,3
5		9,1	6,1	4,0	2,8	2,4	2,0	5,1	3,6	3,0	61,6	85,5	104,6	79,3
$\mu$		<b>9,0</b>	<b>5,8</b>	<b>4,1</b>	<b>2,9</b>	<b>2,5</b>	<b>1,8</b>	<b>5,4</b>	<b>3,7</b>	<b>2,8</b>	<b>69,3</b>	<b>78,4</b>	<b>83,3</b>	<b>78,5</b>
$\sigma_R$		0,5	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	8,4	11,4	15,5	6,2

**Tab. P7** Hodnoty meze pevnosti v ohybu „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A 218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A 218 Black 21N			
1	62,9	193,9	252,3	297,0	233,0	282,3	349,2	236,2	270,3	358,7	69,6	69,2	64,5	64,3
2	63,8	198,2	251,1	297,0	221,5	276,3	341,1	229,4	276,3	365,0	69,5	69,8	66,8	63,8
3	62,5	199,9	243,6	291,6	224,9	272,7	369,9	229,2	284,7	354,6	69,6	69,1	64,4	64,2
4	62,9	200,6	246,6	292,2	207,1	281,7	363,2	231,8	279,3	368,6	69,0	68,3	64,6	64,4
5	62,8	197,8	236,2	294,6	224,2	281,1	335,7	228,0	284,7	372,2	69,1	67,9	64,7	63,7
$\mu$	<b>63,0</b>	<b>198,1</b>	<b>246,0</b>	<b>294,5</b>	<b>222,1</b>	<b>278,8</b>	<b>351,8</b>	<b>230,9</b>	<b>279,1</b>	<b>363,8</b>	<b>69,4</b>	<b>68,9</b>	<b>65,0</b>	<b>64,1</b>
$\sigma_R$	0,4	2,3	5,8	2,3	8,4	3,7	12,9	2,9	5,4	6,4	0,3	0,7	0,9	0,3

**Tab. P8** Hodnoty modulu pružnosti v ohybu „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A 218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A218 Black 21N			
1	1615	6600	9900	12750	8280	12150	17550	9960	13800	22525	1953	1878	1988	2025
2	1688	6360	9450	12300	7080	11400	18450	9600	13950	21375	1878	2025	1888	2025
3	1575	6720	8850	12000	7320	10500	19575	9600	13800	21150	1875	1988	1878	2175
4	1575	7860	9000	12000	6720	11700	18225	9600	13950	20950	1878	1913	1988	1800
5	1500	6480	8280	12150	7200	11400	17775	9240	13800	21825	1838	2025	1913	2065
$\mu$	<b>1591</b>	<b>6804</b>	<b>9096</b>	<b>12240</b>	<b>7320</b>	<b>11430</b>	<b>18315</b>	<b>9600</b>	<b>13860</b>	<b>21565</b>	<b>1884</b>	<b>1966</b>	<b>1931</b>	<b>2018</b>
$\sigma_R$	61	542	549	278	520	540	706	228	74	561	38	60	48	122

**Tab. P9** Hodnoty rázové houževnatosti Charpy „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A218 Black 21N			
1	NB	84,6	85,5	82,1	41,6	78,9	95,5	74,2	62,7	84,9	NB	-	158,5	116,0
2	NB	89,1	82,7	93,5	50,2	74,9	87,2	73,7	78,6	87,9	NB	276,8	233,5	127,3
3	NB	83,0	78,0	91,6	48,4	41,8	91,2	76,6	78,7	85,5	NB	273,8	195,3	114,8
4	NB	81,3	93,1	88,7	61,3	66,7	68,8	73,3	73,7	84,6	NB	256,0	190,5	123,0
5	NB	88,6	81,8	99,3	40,9	72,2	76,6	71,5	75,5	82,7	NB	267,0	222,5	100,8
6	NB	81,3	84,1	90,4	64,7	85,9	75,1	70,4	68,6	77,1	NB	295,0	238,3	120,3
7	NB	81,8	83,3	97,0	37,1	66,5	89,4	77,2	65,5	83,6	NB	288,3	249,0	95,3
8	NB	84,9	84,7	95,5	44,9	74,9	65,5	76,9	76,6	83,8	NB	255,8	212,3	106,0
9	NB	93,5	84,0	87,4	60,4	87,3	101,7	71,3	74,5	89,3	NB	-	211,8	101,0
10	NB	78,5	83,0	99,9	46,6	59,1	81,2	76,6	63,9	87,5	NB	-	198,3	116,0
$\mu$	<b>NB</b>	<b>84,7</b>	<b>84,0</b>	<b>92,5</b>	<b>49,6</b>	<b>70,8</b>	<b>83,2</b>	<b>74,2</b>	<b>71,8</b>	<b>84,7</b>	<b>NB</b>	<b>273,2</b>	<b>211,0</b>	<b>112,0</b>
$\sigma_R$	<b>NB</b>	4,3	3,6	5,3	9,0	12,7	11,2	2,4	5,8	3,2	<b>NB</b>	13,9	25,3	10,1

**Tab. P10** Hodnoty tvrdosti Shore D „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A218 Black 21N			
1	72,0	76,9	78,4	79,5	79,1	79,5	81,4	76,6	77,1	80,7	73,4	71,7	71,6	70,8
2	71,4	76,6	79,0	79,3	78,9	80,3	82,7	76,3	78,7	79,4	73,7	71,8	71,4	70,8
3	71,4	76,6	78,8	80,5	79,4	80,6	82,3	75,9	76,6	80,2	74,1	71,9	71,6	71,1
4	71,4	77,1	78,4	79,6	79,5	80,5	80,5	75,7	78,9	80,0	73,8	71,8	71,7	70,9
5	71,2	75,9	79,1	80,5	79,1	80,2	81,9	75,6	78,1	80,0	73,5	72,0	71,9	70,2
6	71,8	77,3	79,7	79,9	77,5	80,3	80,2	75,5	77,6	80,4	72,7	72,4	71,6	70,9
7	70,9	76,6	78,0	80,1	77,3	81,5	80,4	76,1	79,4	79,7	72,7	72,3	71,9	70,8
8	70,9	76,9	78,4	81,2	77,8	80,3	80,5	77,0	78,9	80,5	72,4	72,0	70,8	70,2
9	70,7	75,9	79,2	80,5	78,1	80,5	81,5	76,6	79,3	80,1	72,2	71,7	71,3	70,6
10	70,6	76,6	79,1	79,3	78,4	81,4	80,3	76,6	79,3	80,2	72,4	71,9	70,9	70,5
$\mu$	<b>71,2</b>	<b>76,6</b>	<b>78,8</b>	<b>80,0</b>	<b>78,5</b>	<b>80,5</b>	<b>81,2</b>	<b>76,2</b>	<b>78,4</b>	<b>80,1</b>	<b>73,1</b>	<b>72,0</b>	<b>71,5</b>	<b>70,7</b>
SR	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	0,6	0,9	0,5	0,9	0,4	0,6	0,2	0,4	0,3

**Tab. P11** Hodnoty hustoty „klasických kompozitů“

	PA 66	PA 66			PA 66			PA 66			PA 66			
		30% GF	40% GF	50% GF	30% LGF	45% LGF	60% LGF	20% CF	30% CF	40% CF	4% GB	6% GB	8% GB	12% GB
	Technyl A218 Black 21N	Technyl A218 21N + Technyl A218 V50 21N		Technyl A218 V50 21N	Celstran GF60-02 + Technyl A218 21N		Celstran GF60-02	Luvocom 1/CF/40 + Technyl A218 21N		Luvocom 1/CF/40	Technyl A218 Black 21N			
1	1,15	1,36	1,44	1,56	1,36	1,52	1,71	1,22	1,26	1,31	1,14	1,13	1,13	1,12
2	1,15	1,37	1,45	1,56	1,36	1,51	1,70	1,22	1,26	1,31	1,14	1,13	1,13	1,12
3	1,15	1,36	1,46	1,56	1,35	1,53	1,70	1,22	1,26	1,31	1,14	1,13	1,13	1,12
4	1,15	1,36	1,44	1,56	1,36	1,52	1,70	1,22	1,26	1,31	1,14	1,13	1,13	1,12
5	1,15	1,37	1,46	1,56	1,35	1,52	1,69	1,22	1,26	1,31	1,14	1,13	1,14	1,12
$\mu$	<b>1,15</b>	<b>1,36</b>	<b>1,45</b>	<b>1,56</b>	<b>1,36</b>	<b>1,52</b>	<b>1,70</b>	<b>1,22</b>	<b>1,26</b>	<b>1,31</b>	<b>1,14</b>	<b>1,13</b>	<b>1,13</b>	<b>1,12</b>
SR	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



### Příloha č. 3: Hodnoty jednotlivých vlastností hybridních kompozitů na bázi matrice PA 66

Tab. P12 Hodnoty meze pevnosti v tahu ( $\sigma_m$ ) hybridních kompozitů

měření	4%GB + 13,5%CF	4%GB + 20%CF	4%GB + 20%GF	4%GB + 20%LGF	4%GB + 26,5%CF	4%GB + 26,5%GF
1	109,4	130,5	86,1	112,5	157,7	104,0
2	105,5	130,3	81,4	108,0	153,1	101,1
3	106,8	135,0	84,5	107,1	156,5	104,4
4	103,6	134,3	81,1	106,0	157,3	105,2
5	111,1	134,5	84,6	119,6	154,8	102,3
$\mu$	107,3	132,9	83,5	110,6	155,9	103,4
$s_R$	2,7	2,1	2,0	5,0	1,7	1,5

měření	4%GB + 30%LGF	4%GB + 33,5%GF	4%GB + 40%LGF	6%GB + 10%CF	6%GB + 15%CF	6%GB + 15%GF
1	136,1	118,8	152,5	85,1	113,7	65,6
2	123,2	123,6	152,6	83,9	102,4	66,6
3	127,9	121,3	153,2	89,6	114,6	65,4
4	131,3	124,0	158,7	84,0	105,6	67,4
5	123,3	124,6	158,2	87,7	114,8	66,8
$\mu$	128,4	122,5	155,0	86,1	110,2	66,4
$s_R$	4,9	2,1	2,8	2,2	5,2	0,8

měření	6%GB + 15%LGF	6%GB + 20%CF	6%GB + 20%GF	6%GB + 22,5%LGF	6%GB + 25%GF	6%GB + 30%LGF
1	94,9	136,9	84,3	108,6	95,3	126,7
2	96,7	126,1	73,4	112,8	96,4	140,6
3	95,2	128,6	80,0	108,3	93,4	129,4
4	94,8	137,5	76,0	111,2	94,0	129,3
5	88,4	125,7	81,2	110,8	96,5	127,1
$\mu$	94,0	131,0	79,0	110,3	95,1	130,6
$s_R$	2,9	5,2	3,9	1,7	1,2	5,1

měření	8%GB + 6,5%CF	8%GB + 10%CF	8%GB + 10%GF	8%GB + 10%LGF	8%GB + 13,5%CF	8%GB + 13,5%GF
1	67,4	82,8	59,0	71,9	97,8	63,9
2	64,9	83,2	59,3	75,5	98,6	63,2
3	67,2	81,2	58,5	68,7	94,8	62,4
4	65,4	81,2	58,0	73,7	93,7	63,2
5	64,2	81,4	58,0	68,7	99,4	63,0
$\mu$	65,8	82,0	58,6	71,7	96,9	63,1
$s_R$	1,3	0,9	0,5	2,7	2,2	0,5

měření	8%GB + 15%LGF	8%GB + 16,5%GF	8%GB + 20%LGF
1	86,0	69,0	92,5
2	88,1	69,3	109,5
3	80,2	66,9	100,8
4	86,6	71,4	97,8
5	86,4	68,4	96,9
$\mu$	85,5	69,0	99,5
$s_R$	2,7	1,5	5,7

**Tab. P13** Hodnoty modulu pružnosti v tahu ( $E_t$ ) hybridních kompozitů

měření	4%GB+13,5%CF	4%GB+20%CF	4%GB+20%GF	4%GB+20%LGF	4%GB+26,5%CF	4%GB+26,5%GF
1	7816	10808	4714	5643	13814	6415
2	7881	10937	4773	5845	14092	6441
3	7736	10955	4646	5537	13831	6261
4	7782	10846	4737	5481	13709	6340
5	7623	10306	4722	5254	14139	6153
$\mu$	7767	10770	4718	5552	13917	6322
$s_R$	86	239	41	194	168	105

měření	4%GB+30%LGF	4%GB+33,5%GF	4%GB+40%LGF	6%GB+10%CF	6%GB+15%CF	6%GB+15%GF
1	7305	7941	9782	5267	7876	3763
2	7509	7683	9690	5700	7819	3475
3	7181	7737	9874	5561	8438	3405
4	7430	7936	10176	5394	8258	3560
5	7567	7997	9549	5697	8217	3556
$\mu$	7398	7859	9814	5524	8122	3552
$s_R$	140	125	210	170	237	120

měření	6%GB+15%LGF	6%GB+20%CF	6%GB+20%GF	6%GB+22,5%LGF	6%GB+25%GF	6%GB+30%LGF
1	5011	10400	4846	5644	6091	7297
2	4538	10271	4719	5869	5713	6861
3	4894	10630	4941	5661	5961	7910
4	4733	10490	4744	6242	5847	7242
5	4636	10431	4756	6367	5880	7745
$\mu$	4762	10444	4801	5957	5898	7411
$s_R$	171	117	82	298	125	376

měření	8%GB+6,5%CF	8%GB+10%CF	8%GB+10%GF	8%GB+10%LGF	8%GB+13,5%CF	8%GB+13,5%GF
1	3868	5446	3164	3419	7287	3620
2	3742	5481	3011	3503	7318	3434
3	3926	5841	3079	3288	7275	3538
4	3776	5292	3166	3918	7207	3653
5	3930	5350	3149	3541	7221	3518
$\mu$	3848	5482	3114	3534	7262	3553
$s_R$	77	192	61	211	42	78

měření	8%GB+15%LGF	8%GB+16,5%GF	8%GB+20%LGF
1	4439	3939	5005
2	4422	3817	5826
3	4302	3871	5201
4	4272	3881	4973
5	4278	4026	5046
$\mu$	4343	3907	5210
$s_R$	73	71	318

**Tab. P14** Hodnoty poměrného prodloužení při přetržení ( $\epsilon_b$ ) hybridních kompozitů

měření	4%GB + 13,5%CF	4%GB + 20%CF	4%GB + 20%GF	4%GB + 20%LGF	4%GB + 26,5%CF	4%GB + 26,5%GF
1	6,2	5,0	9,2	3,2	3,1	7,2
2	6,3	5,2	10,4	3,4	3,5	7,4
3	6,5	4,6	10,0	3,8	3,2	6,0
4	6,3	4,5	9,5	3,6	3,4	6,7
5	5,7	4,3	9,0	3,2	3,6	6,8
$\mu$	6,2	4,7	9,6	3,4	3,4	6,8
$s_R$	0,3	0,3	0,5	0,2	0,2	0,5

měření	4%GB + 30%LGF	4%GB + 33,5%GF	4%GB + 40%LGF	6%GB + 10%CF	6%GB + 15%CF	6%GB + 15%GF
1	2,9	5,1	2,6	7,7	5,2	16,1
2	3,8	4,5	2,7	7,1	5,7	16,2
3	3,2	4,5	2,7	7,2	4,6	14,2
4	3,1	4,7	2,5	7,3	5,7	17,2
5	3,8	4,7	2,7	7,3	4,5	15,7
$\mu$	3,4	4,7	2,6	7,3	5,2	15,9
$s_R$	0,4	0,2	0,1	0,2	0,5	1,0

měření	6%GB + 15%LGF	6%GB + 20%CF	6%GB + 20%GF	6%GB + 22,5%LGF	6%GB + 25%GF	6%GB + 30%LGF
1	3,6	4,4	9,2	3,2	5,8	3,2
2	3,4	2,8	9,5	3,3	6,7	2,8
3	3,6	4,5	9,7	3,3	6,4	3,3
4	3,7	4,3	9,8	3,2	4,8	3,0
5	3,5	4,4	8,5	3,3	6,0	2,8
$\mu$	3,5	4,1	9,3	3,3	5,9	3,0
$s_R$	0,1	0,6	0,5	0,0	0,6	0,2

měření	8%GB + 6,5%CF	8%GB + 10%CF	8%GB + 10%GF	8%GB + 10%LGF	8%GB + 13,5%CF	8%GB + 13,5%GF
1	9,3	6,6	17,2	4,7	6,2	13,8
2	8,9	7,3	16,0	5,2	5,6	14,6
3	9,5	6,9	19,7	6,4	5,6	14,5
4	10,6	8,0	16,5	5,3	6,2	14,4
5	11,1	7,3	18,3	6,9	5,6	13,2
$\mu$	9,9	7,2	17,6	5,7	5,9	14,1
$s_R$	0,8	0,5	1,3	0,8	0,3	0,5

měření	8%GB + 15%LGF	8%GB + 16,5%GF	8%GB + 20%LGF
1	4,2	11,9	3,1
2	3,7	12,6	3,3
3	3,6	11,5	3,6
4	3,7	11,8	3,5
5	3,8	11,8	3,8
$\mu$	3,8	11,9	3,5
$s_R$	0,2	0,4	0,2

**Tab. P15** Hodnoty meze pevnosti v ohybu ( $\sigma_{FM}$ ) hybridních kompozitů

měření	4%GB + 20%CF	4%GB + 20%GF	4%GB + 26,5%CF	4%GB + 26,5%GF	4%GB + 33,5%GF	4%GB + 13,5%CF
1	221,5	145,8	253,2	184,1	209,3	174,7
2	216,5	145,4	246,9	184,3	213,8	181,2
3	219,4	145,1	258,6	187,7	218,4	180,0
4	221,0	142,4	264,0	182,9	216,0	172,3
5	217,7	143,0	249,0	181,2	207,1	181,7
$\mu$	219,2	144,3	254,3	184,0	212,9	178,0
$s_R$	1,9	1,4	6,3	2,1	4,2	3,8

měření	4%GB + 20%LGF	4%GB + 30%LGF	4%GB + 40%LGF	6%GB + 10%CF	6%GB + 15%CF	6%GB + 20%CF
1	188,6	222,7	236,2	180,5	175,0	203,5
2	177,8	213,1	269,7	168,5	175,2	213,8
3	187,7	212,6	259,5	167,5	172,8	208,6
4	187,4	217,0	271,5	171,1	177,4	218,6
5	185,3	221,5	277,5	187,2	173,3	206,9
$\mu$	185,4	217,4	262,9	175,0	174,7	210,3
$s_R$	3,9	4,2	14,5	7,7	1,6	5,3

měření	6%GB + 20%GF	6%GB + 25%GF	6%GB + 15%GF	6%GB + 15%LGF	6%GB + 22,5%LGF	6%GB + 30%LGF
1	157,7	167,3	109,4	151,0	187,9	205,4
2	138,8	170,9	108,1	163,4	188,9	235,0
3	144,9	173,8	111,8	157,4	180,2	198,7
4	147,6	177,8	108,7	150,5	190,1	215,8
5	136,7	165,8	108,5	163,2	187,2	211,2
$\mu$	145,1	171,1	109,3	157,1	186,9	213,2
$s_R$	7,4	4,4	1,3	5,6	3,5	12,3

měření	8%GB + 6,5%CF	8%GB + 10%CF	8%GB + 10%GF	8%GB + 13,5%CF	8%GB + 13,5%GF	8%GB + 10%LGF
1	80,4	144,3	99,4	163,9	113,0	111,6
2	99,1	140,1	98,8	164,9	106,7	124,1
3	98,6	135,5	100,8	161,3	104,4	123,5
4	97,6	148,2	97,9	161,5	108,0	119,8
5	103,7	142,5	100,1	160,6	107,3	129,2
$\mu$	95,9	142,1	99,4	162,4	107,9	121,6
$s_R$	8,0	4,2	1,0	1,7	2,8	5,8

měření	8%GB + 15%LGF	8%GB + 16,5%GF	8%GB + 20%LGF
1	149,6	112,8	167,5
2	147,5	125,3	168,0
3	152,9	115,0	166,1
4	152,6	114,4	172,1
5	159,4	122,6	173,0
$\mu$	152,4	118,0	169,3
$s_R$	4,0	5,0	2,7

**Tab. P16** Hodnoty modulu pružnosti v ohybu ( $E_f$ ) hybridních kompozitů

měření	4%GB + 13,5%CF	4%GB + 20%CF	4%GB + 20%GF	4%GB + 20%LGF	4%GB + 26,5%CF	4%GB + 26,5%GF
1	7440	11280	5100	6000	14400	6600
2	8280	10800	5100	5880	13800	6840
3	8040	11280	5025	5880	15150	6960
4	7680	11160	4125	6000	15150	6960
5	8040	10920	4725	6000	13950	6480
$\mu$	7896	11088	4815	5952	14490	6768
$s_R$	298	195	372	59	574	195

měření	4%GB + 30%LGF	4%GB + 33,5%GF	4%GB + 40%LGF	6%GB + 10%CF	6%GB + 15%CF	6%GB + 15%GF
1	7800	8520	9480	7080	8280	3420
2	7320	8640	11400	6600	8280	3360
3	7560	8400	10050	6360	8160	3600
4	8040	8760	10950	5640	8160	3720
5	7560	7680	11100	8040	8160	3720
$\mu$	7656	8400	10596	6744	8208	3564
$s_R$	245	380	717	797	59	150

měření	6%GB + 15%LGF	6%GB + 20%CF	6%GB + 20%GF	6%GB + 22,5%LGF	6%GB + 25%GF	6%GB + 30%LGF
1	4560	10560	5640	6000	5860	7560
2	4920	11280	5025	6120	6720	8280
3	4680	10680	5325	6000	6840	7080
4	4560	11640	4725	6480	6720	8280
5	4920	10500	4125	6000	6360	8040
$\mu$	4728	10932	4968	6120	6500	7848
$s_R$	163	450	520	186	358	465

měření	8%GB + 6,5%CF	8%GB + 10%CF	8%GB + 10%GF	8%GB + 10%LGF	8%GB + 13,5%CF	8%GB + 13,5%GF
1	3380	6450	3760	3120	8040	3900
2	3660	6150	3540	3675	7440	3780
3	3660	6000	3480	3825	7440	3600
4	3780	6510	3180	3480	7680	3300
5	4100	6225	3480	3900	7800	3720
$\mu$	3716	6267	3488	3600	7680	3660
$s_R$	233	189	185	280	228	204

měření	8%GB + 15%LGF	8%GB + 16,5%GF	8%GB + 20%LGF
1	4575	3660	5280
2	4500	4350	5280
3	4560	3780	5280
4	4680	3840	5640
5	5040	4125	5640
$\mu$	4671	3951	5424
$s_R$	193	251	176

**Tab. P17** Hodnoty rázové houževnatosti CHARPY ( $a_{cU}$ ) hybridních kompozitů

měření	4%GB + 13,5%CF	4%GB + 20%CF	4%GB + 20%GF	4%GB + 20%LGF	4%GB + 26,5%CF	4%GB + 26,5%GF
1	52,6	56,2	53,8	56,6	57,2	66,2
2	50,5	53,9	58,4	58,9	57,5	62,4
3	56,9	53,3	63,2	54,2	57,8	66,8
4	59,7	57,2	53,8	54,1	57,3	64,6
5	45,3	51,7	59,6	60,2	56,8	61,5
6	51,4	54,4	63,5	59,1	56,6	65,7
7	51,0	58,6	64,5	53,0	57,0	59,7
8	54,2	55,8	61,9	60,7	54,8	59,8
9	59,1	53,9	57,9	58,1	60,7	66,5
10	59,7	49,6	50,2	63,8	61,4	69,0
$\mu$	54,0	54,4	58,7	57,9	57,7	64,2
sR	4,5	2,5	4,6	3,2	1,8	3,0

měření	4%GB + 30%LGF	4%GB + 33,5%GF	4%GB + 40%LGF	6%GB + 10%CF	6%GB + 15%CF	6%GB + 15%GF
1	64,7	68,6	77,8	45,9	51,6	59,7
2	63,8	63,6	75,5	49,4	47,7	65,0
3	63,8	68,4	68,8	53,0	49,4	75,4
4	70,2	67,9	68,6	49,6	51,4	68,8
5	63,7	71,6	73,9	50,0	48,4	67,6
6	68,4	66,5	71,6	46,4	50,6	72,6
7	72,0	69,4	77,6	51,0	53,8	64,7
8	72,6	68,2	74,6	48,0	50,0	75,7
9	66,4	65,9	72,5	48,4	52,0	68,0
10	71,1	71,4	68,8	30,9	51,8	71,9
$\mu$	67,7	68,1	73,0	47,2	50,7	68,9
sR	3,4	2,3	3,3	5,8	1,7	4,8

měření	6%GB + 15%LGF	6%GB + 20%CF	6%GB + 20%GF	6%GB + 22,5%LGF	6%GB + 25%GF	6%GB + 30%LGF
1	54,1	57,8	56,0	60,2	58,4	65,2
2	57,8	48,9	58,3	62,7	59,3	69,7
3	50,3	49,6	54,6	60,9	58,2	66,8
4	46,9	46,8	61,3	62,2	61,5	64,2
5	57,3	52,2	56,2	60,5	59,5	63,8
6	53,0	51,7	57,4	64,3	53,5	65,6
7	59,9	53,4	56,9	65,3	58,3	69,4
8	47,5	47,0	60,3	60,5	50,4	69,5
9	52,8	48,2	56,3	64,1	55,5	65,9
10	59,3	45,1	56,8	64,9	63,4	68,6
$\mu$	53,9	50,1	57,4	62,5	57,8	66,9
sR	4,4	3,6	1,9	1,9	3,6	2,2

**Tab. P18** Hodnoty rázové houževnatosti CHARPY ( $a_{cU}$ ) hybridních kompozitů - pokračování

měření	8%GB + 6,5%CF	8%GB + 10%CF	8%GB + 10%GF	8%GB + 10%LGF	8%GB + 13,5%CF	8%GB + 13,5%GF
1	63,1	46,7	55,2	46,5	45,1	52,4
2	66,8	42,9	58,3	48,2	45,2	57,0
3	67,4	49,1	65,3	50,6	43,2	52,5
4	60,8	53,6	55,1	47,8	46,5	60,9
5	67,8	44,4	65,4	50,4	47,0	55,6
6	60,5	49,5	52,1	48,4	42,4	64,3
7	66,6	50,0	62,2	49,0	41,5	61,2
8	58,7	46,5	63,1	50,9	42,4	54,9
9	67,4	48,8	62,8	47,7	42,3	49,8
10	64,7	50,4	59,3	49,8	40,9	61,8
$\mu$	64,4	48,2	59,9	48,9	43,6	57,0
sR	3,2	3,0	4,4	1,4	2,0	4,6

měření	8%GB + 15%LGF	8%GB + 16,5%GF	8%GB + 20%LGF
1	53,4	61,9	58,7
2	56,1	58,5	56,4
3	56,4	65,1	62,9
4	52,8	60,9	54,5
5	54,4	61,1	59,5
6	52,6	62,1	58,9
7	52,3	65,3	56,8
8	53,8	60,8	55,4
9	52,0	62,4	63,0
10	53,9	71,7	61,9
$\mu$	53,8	63,0	58,8
sR	1,4	3,5	2,9

**Tab. P19** Hodnoty tvrdosti SHORE D hybridních kompozitů

měření	4%GB + 13,5%CF	4%GB + 20%CF	4%GB + 20%GF	4%GB + 20%LGF	4%GB + 26,5%CF	4%GB + 26,5%GF
1	75,7	77,5	74,8	71,8	77,9	76,5
2	75,9	77,3	75,6	71,4	78,2	76,4
3	75,9	77,4	75,2	71,8	78,8	75,9
4	76,7	79,1	76,2	71,7	79,8	76,4
5	76,7	77,9	75,9	72,6	77,7	75,9
6	76,3	76,6	75,2	72,5	78,1	75,9
7	75,9	78,0	75,5	71,3	78,2	75,6
8	76,0	78,1	75,2	72,7	78,8	75,9
9	76,4	77,5	75,2	72,9	78,1	75,5
10	76,3	76,8	75,0	72,4	78,0	75,5
$\mu$	76,2	77,6	75,4	72,1	78,4	76,0
$s_R$	0,3	0,7	0,4	0,5	0,6	0,4

měření	4%GB + 30%LGF	4%GB + 33,5%GF	4%GB + 40%LGF	6%GB + 10%CF	6%GB + 15%CF	6%GB + 15%GF
1	74,1	77,8	73,8	74,7	75,3	71,6
2	73,6	78,1	75,5	74,9	75,2	71,8
3	73,3	78,4	74,4	74,5	76,5	71,3
4	73,3	77,3	76,5	75,2	75,8	71,8
5	72,9	76,5	75,0	75,2	75,5	72,0
6	73,4	77,4	74,1	74,5	75,7	71,9
7	73,4	77,3	75,2	73,9	75,3	72,0
8	73,4	76,3	73,6	74,4	75,9	72,0
9	75,2	75,7	73,0	74,6	75,1	72,2
10	74,3	76,9	72,4	74,6	75,5	71,6
$\mu$	73,7	77,2	74,4	74,7	75,6	71,8
$s_R$	0,6	0,8	1,2	0,4	0,4	0,3

měření	6%GB + 15%LGF	6%GB + 20%CF	6%GB + 20%GF	6%GB + 22,5%LGF	6%GB + 25%GF	6%GB + 30%LGF
1	69,6	77,0	74,9	69,9	75,9	75,5
2	72,0	76,6	74,4	70,1	76,3	73,2
3	72,4	77,6	74,8	70,9	75,9	73,7
4	71,7	76,8	74,5	70,9	76,2	74,2
5	72,2	76,2	74,8	70,8	75,8	74,3
6	71,0	76,7	74,4	72,0	75,7	74,7
7	71,2	77,3	74,8	70,1	75,9	74,1
8	70,9	77,2	75,1	69,9	75,4	74,1
9	70,6	77,7	75,0	71,3	75,1	75,7
10	70,0	78,4	75,7	69,8	74,5	74,5
$\mu$	71,2	77,2	74,8	70,6	75,7	74,4
$s_R$	0,9	0,6	0,4	0,7	0,5	0,7



**Tab. P20** Hodnoty tvrdosti SHORE D hybridních kompozitů - pokračování

měření	8%GB + 6,5%CF	8%GB + 10%CF	8%GB + 10%GF	8%GB + 10%LGF	8%GB + 13,5%CF	8%GB + 13,5%GF
1	70,6	74,1	73,0	68,6	75,2	73,6
2	70,3	74,1	72,7	69,9	75,7	74,2
3	70	74,5	72,7	69,4	75,4	73,4
4	71,3	74,3	73,2	69,8	75,3	74,1
5	71,3	74,3	73,1	69,7	75,1	73,7
6	71,8	74,1	72,9	69,0	75,7	72,9
7	70,4	74,2	73,8	69,1	74,5	72,9
8	70,2	74,7	73,6	69,4	74,8	73,1
9	70,2	74,5	73,0	69,3	74,4	72,5
10	69,9	74,5	73,0	69,5	75,0	72,7
$\mu$	70,6	74,3	73,1	69,4	75,1	73,3
$s_R$	0,6	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6

měření	8%GB + 15%LGF	8%GB + 16,5%GF	8%GB + 20%LGF
1	69,2	72,4	70,9
2	69,8	72,6	70,9
3	69,7	72,4	70,8
4	69,2	72,9	70,7
5	70,2	72,7	71,3
6	69,4	72,9	71,2
7	69,8	72,3	70,0
8	69,5	72,4	70,9
9	69,4	72,3	70,6
10	68,9	72,6	70,5
$\mu$	69,5	72,6	70,8
$s_R$	0,4	0,2	0,4

**Tab. P21** Hodnoty hustoty hybridních kompozitů

měření	4%GB + 13,5%CF	4%GB + 20%CF	4%GB + 20%GF	4%GB + 20%LGF	4%GB + 26,5%CF	4%GB + 26,5%GF
1	1,178	1,202	1,268	1,278	1,228	1,314
2	1,178	1,199	1,255	1,284	1,235	1,311
3	1,182	1,204	1,257	1,263	1,222	1,308
4	1,181	1,202	1,260	1,285	1,232	1,319
5	1,183	1,204	1,264	1,260	1,227	1,313
$\mu$	1,180	1,202	1,261	1,274	1,229	1,313
$s_R$	0,002	0,002	0,005	0,010	0,005	0,004

měření	4%GB + 30%LGF	4%GB + 33,5%GF	4%GB + 40%LGF	6%GB + 10%CF	6%GB + 15%CF	6%GB + 15%GF
1	1,346	1,376	1,426	1,161	1,175	1,219
2	1,330	1,385	1,458	1,156	1,176	1,222
3	1,348	1,384	1,452	1,157	1,177	1,219
4	1,371	1,400	1,447	1,156	1,179	1,224
5	1,351	1,371	1,428	1,162	1,176	1,223
$\mu$	1,349	1,383	1,442	1,159	1,177	1,221
$s_R$	0,013	0,010	0,013	0,003	0,001	0,002

měření	6%GB + 15%LGF	6%GB + 20%CF	6%GB + 20%GF	6%GB + 22,5%LGF	6%GB + 25%GF	6%GB + 30%LGF
1	1,219	1,192	1,249	1,278	1,310	1,329
2	1,233	1,201	1,255	1,270	1,302	1,321
3	1,237	1,197	1,280	1,287	1,295	1,331
4	1,222	1,204	1,254	1,304	1,289	1,334
5	1,244	1,204	1,253	1,255	1,303	1,333
$\mu$	1,231	1,200	1,258	1,279	1,300	1,330
$s_R$	0,009	0,005	0,011	0,017	0,007	0,005

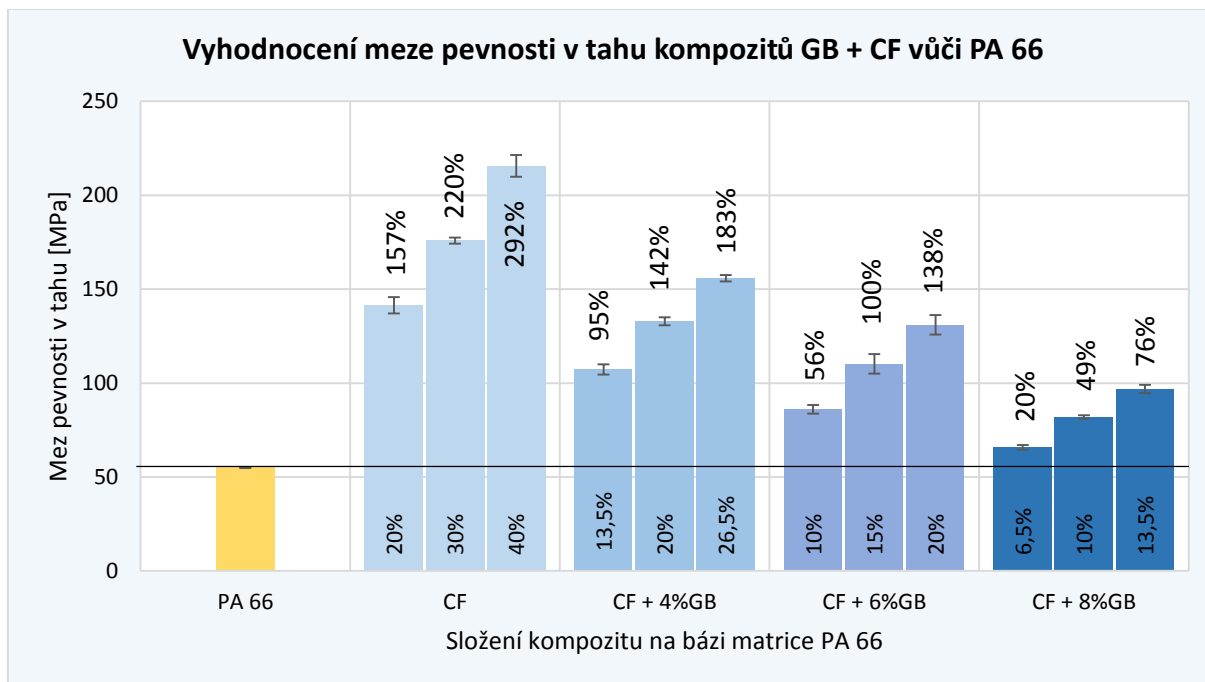
  

měření	8%GB + 6,5%CF	8%GB + 10%CF	8%GB + 10%GF	8%GB + 10%LGF	8%GB + 13,5%CF	8%GB + 13,5%GF
1	1,142	1,151	1,185	1,193	1,160	1,202
2	1,142	1,154	1,174	1,184	1,164	1,201
3	1,144	1,154	1,185	1,177	1,165	1,206
4	1,146	1,152	1,182	1,190	1,161	1,199
5	1,144	1,150	1,186	1,179	1,168	1,201
$\mu$	1,144	1,152	1,182	1,185	1,164	1,202
$s_R$	0,001	0,002	0,004	0,006	0,003	0,002

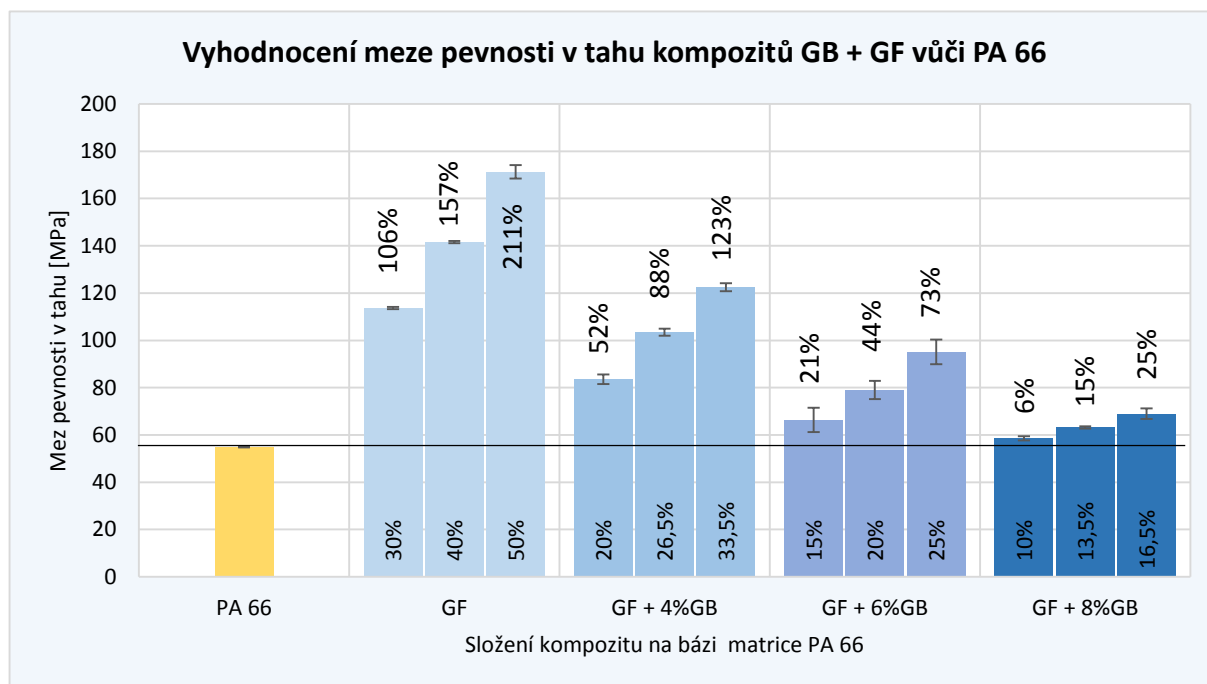
  

měření	8%GB + 15%LGF	8%GB + 16,5%GF	8%GB + 20%LGF
1	1,222	1,242	1,265
2	1,229	1,228	1,238
3	1,240	1,230	1,269
4	1,222	1,226	1,264
5	1,228	1,227	1,249
$\mu$	1,228	1,231	1,257
$s_R$	0,006	0,006	0,012

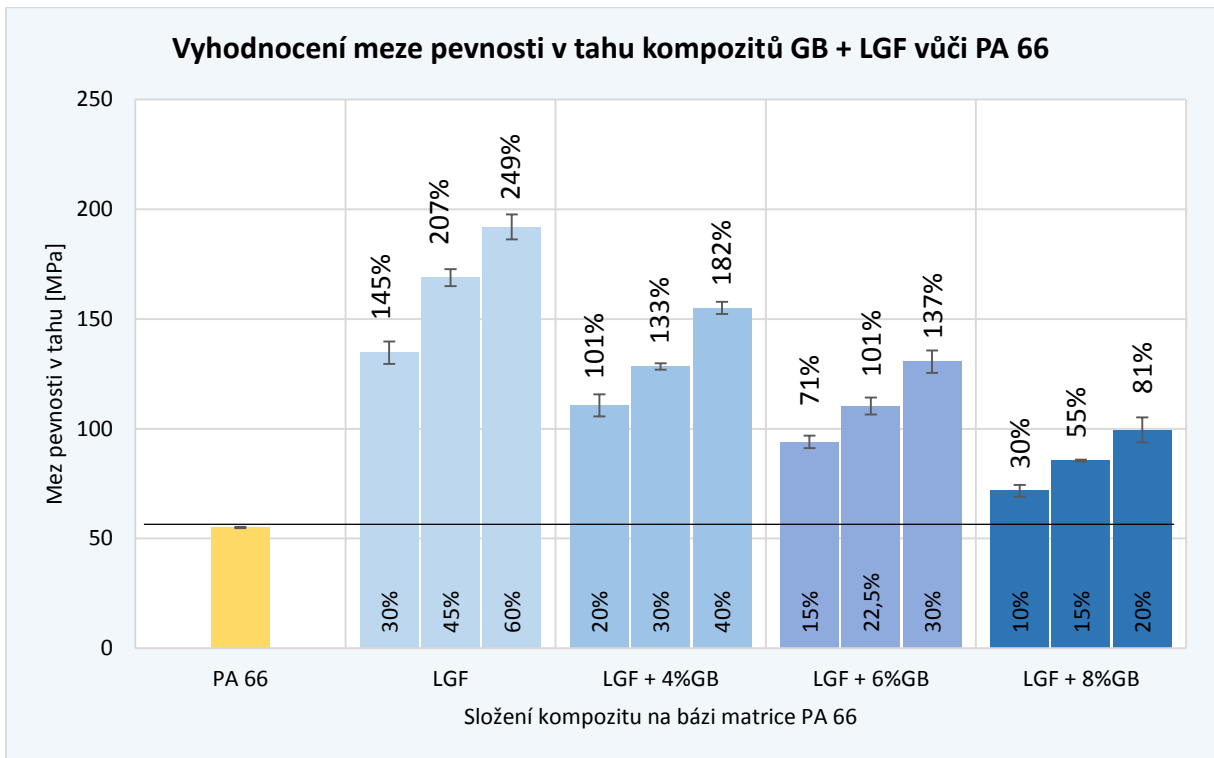
## Příloha č. 4: Procentuální vyhodnocení jednotlivých vlastností hybridních kompozitů vůči matici PA 66



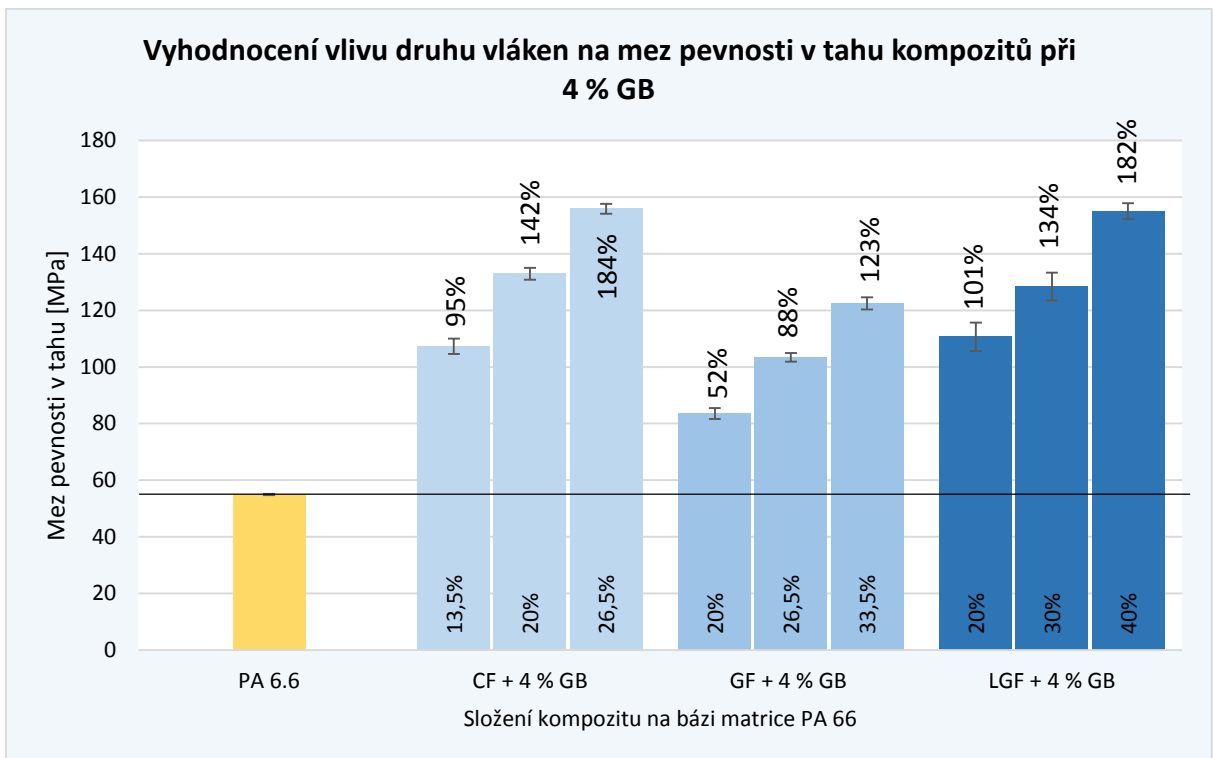
**Obr. P4** Vyhodnocení meze pevnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených uhlíkovými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



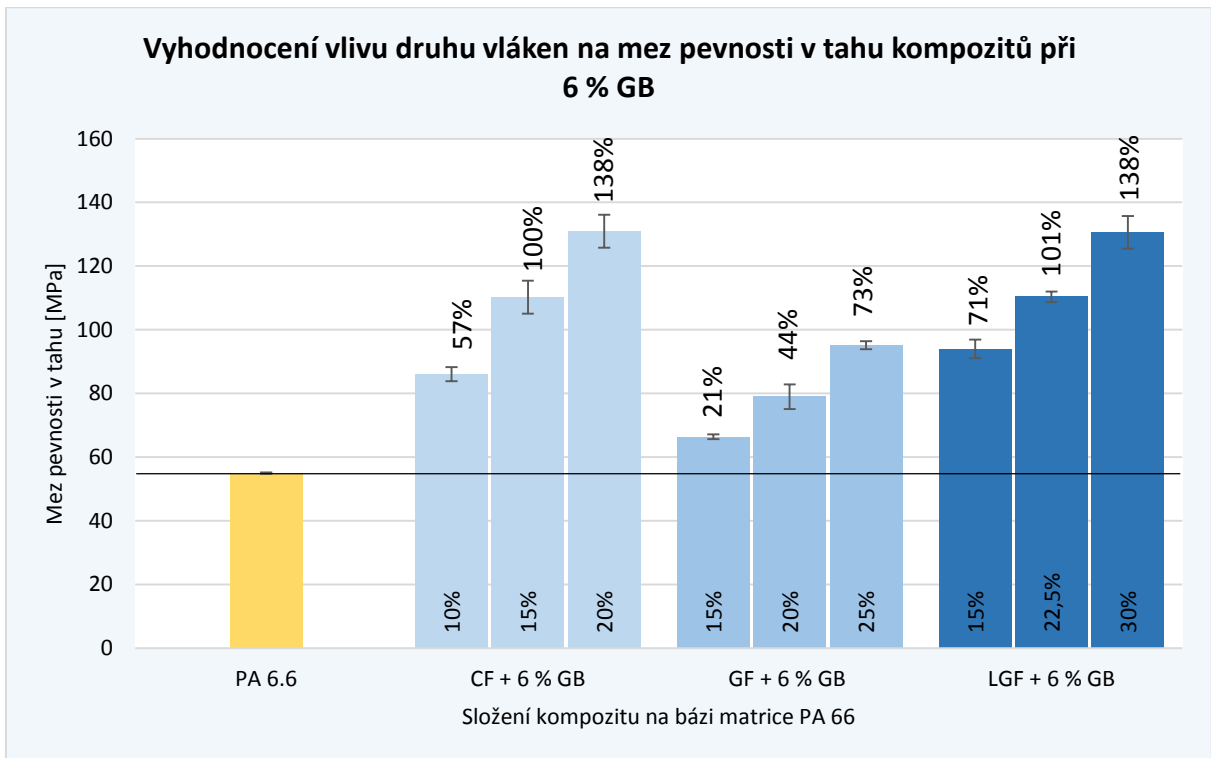
**Obr. P5** Vyhodnocení meze pevnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených krátkými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



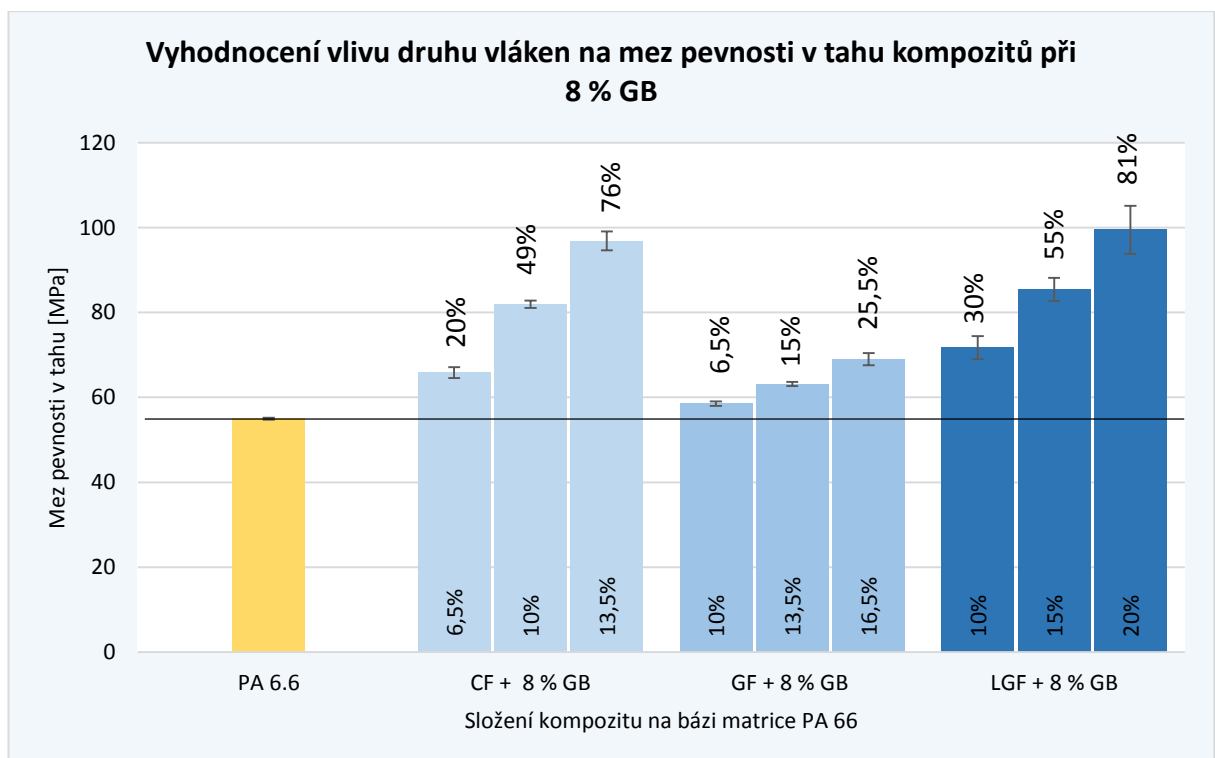
**Obr. P6** Vyhodnocení meze pevnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



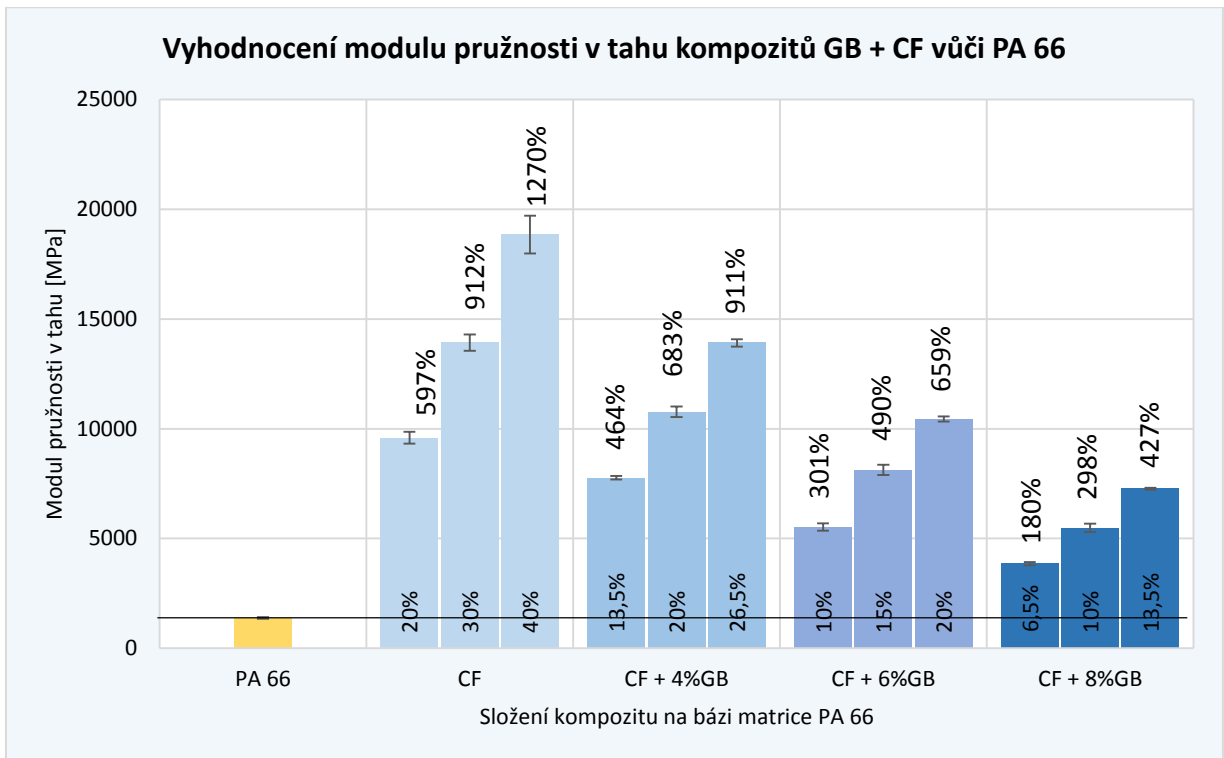
**Obr. P7** Vyhodnocení pevnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 4 % skleněných dutých kuliček



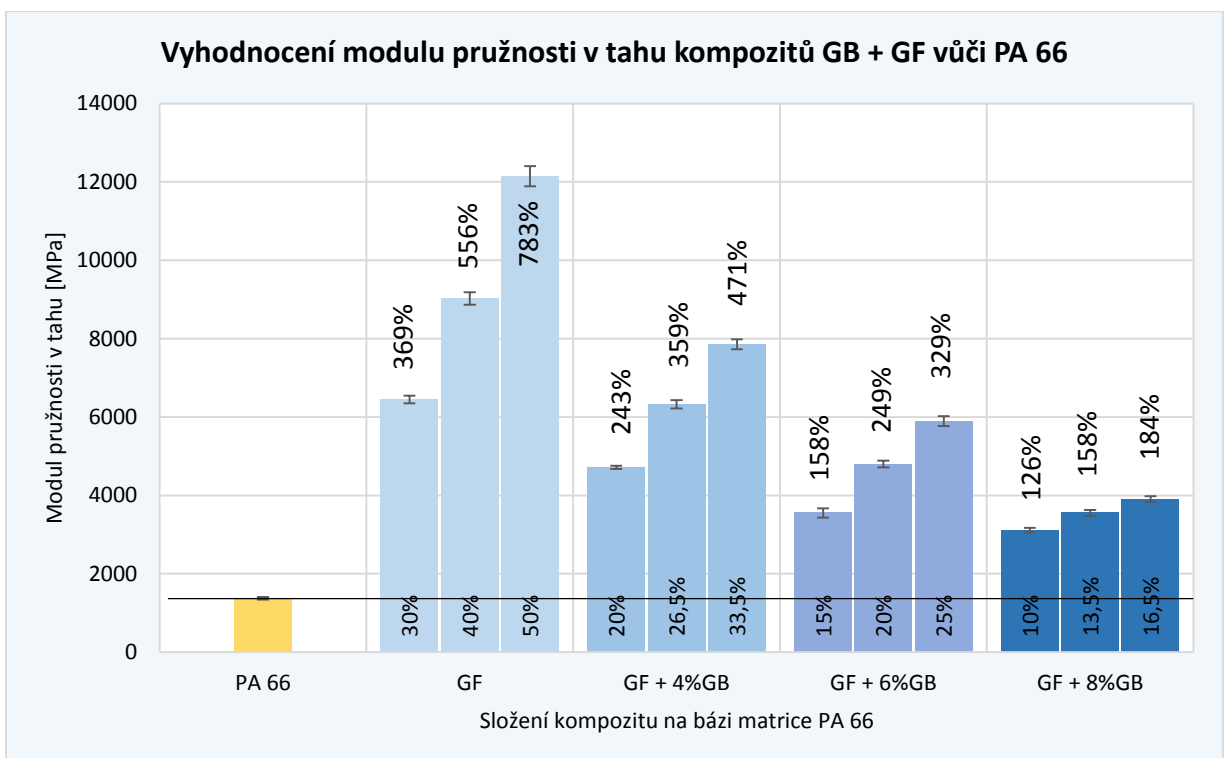
**Obr. P8** Vyhodnocení pevnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 6 % skleněných dutých kuliček



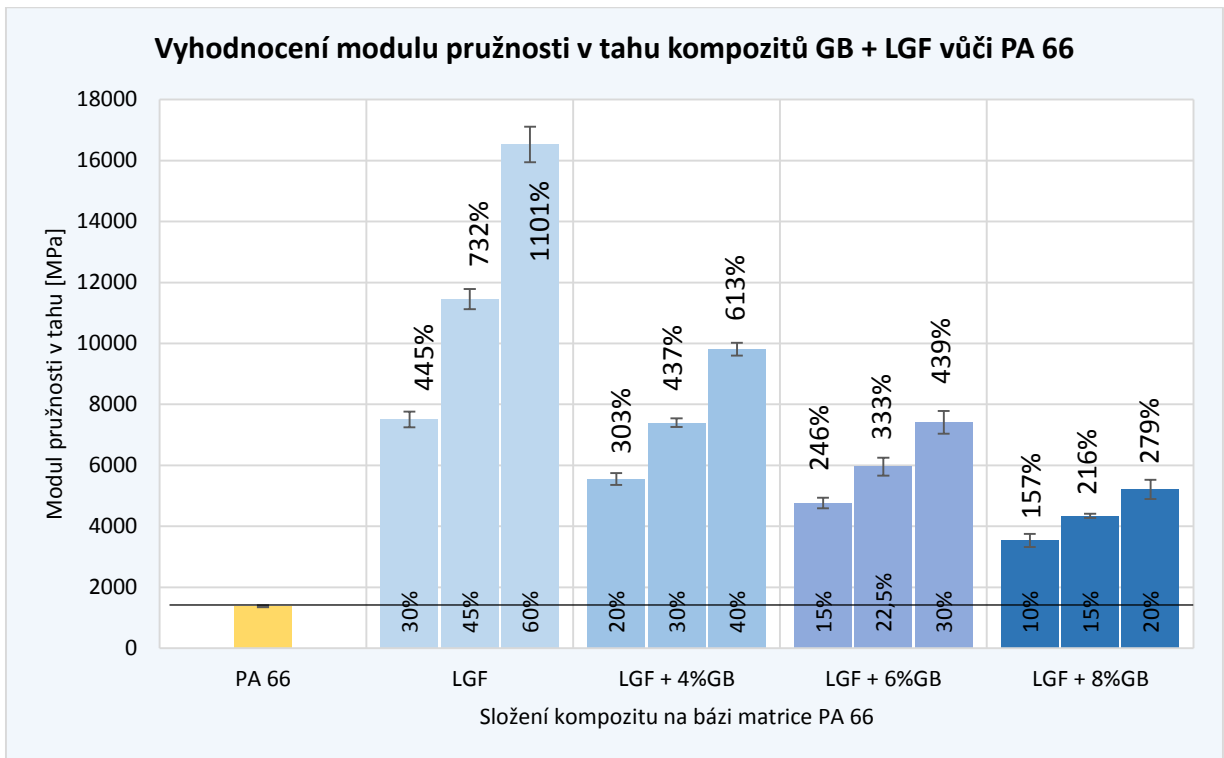
**Obr. P9** Vyhodnocení pevnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 8 % skleněných dutých kuliček



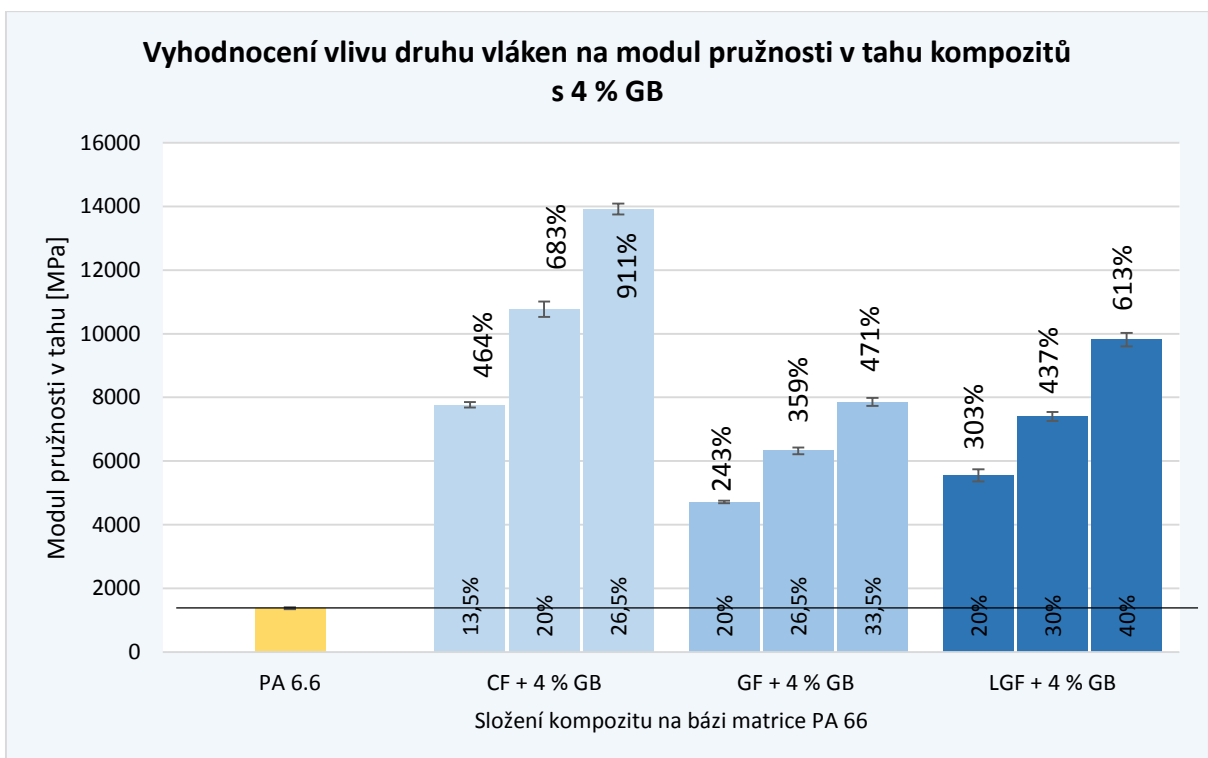
**Obr. P10** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených uhlíkovými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



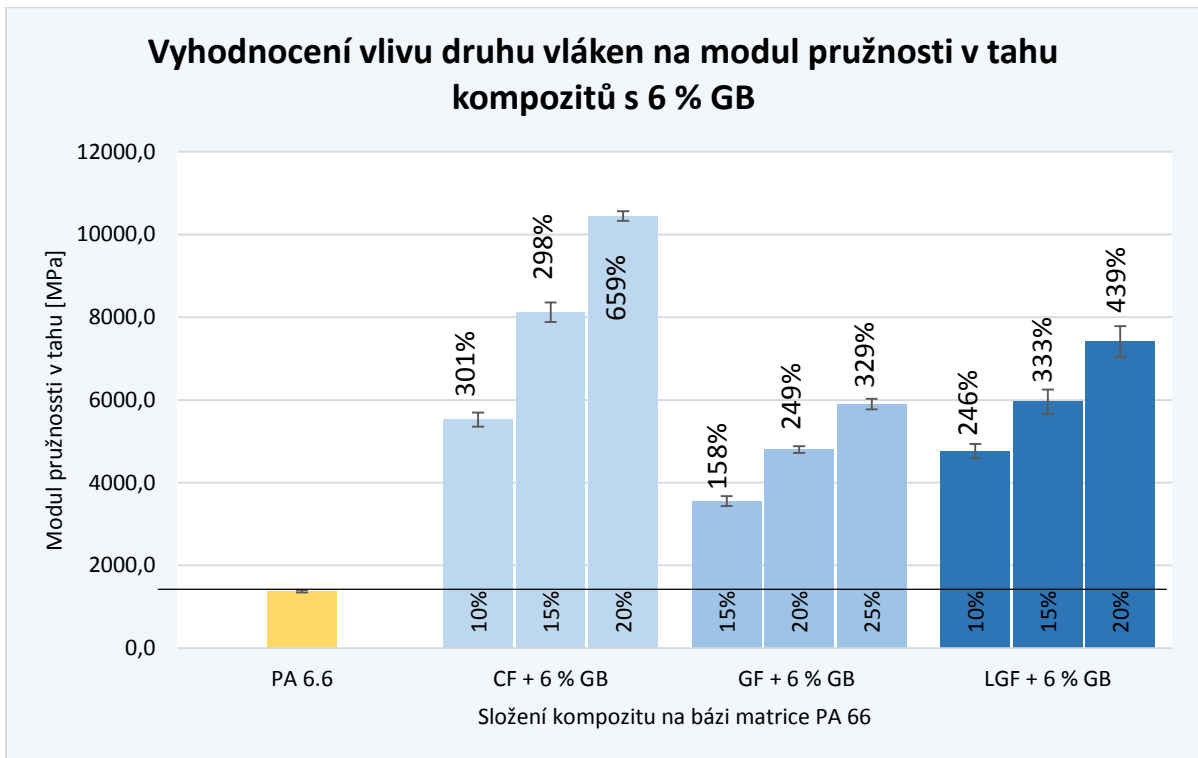
**Obr. P11** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených krátkými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



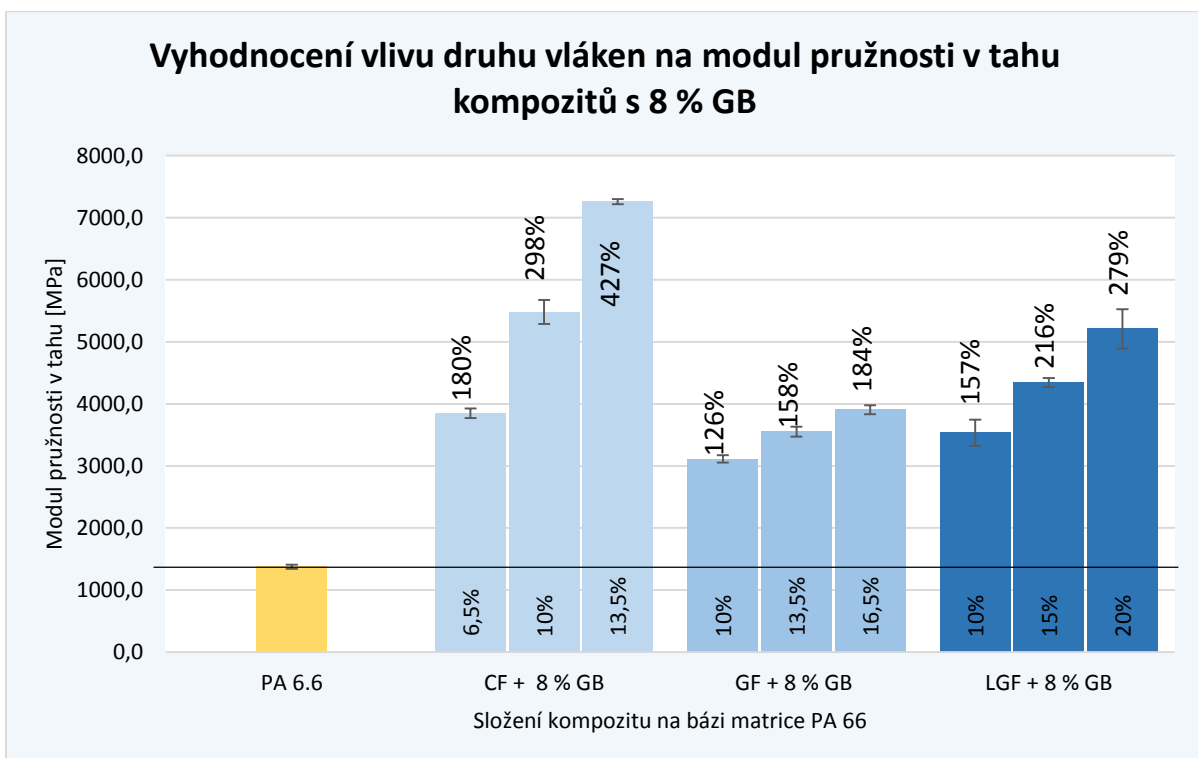
**Obr. P12** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



**Obr. P13** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 4 % skleněných dutých kuliček

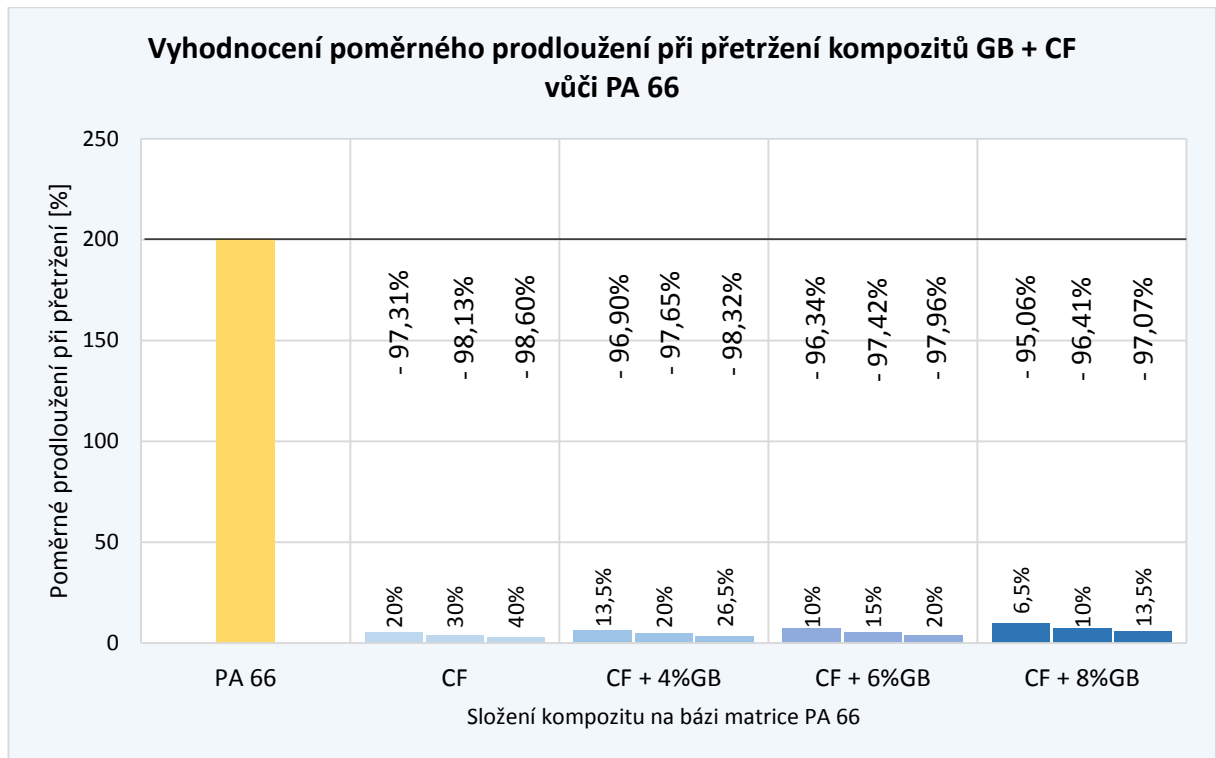


**Obr. P14** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 6 % skleněných dutých kuliček

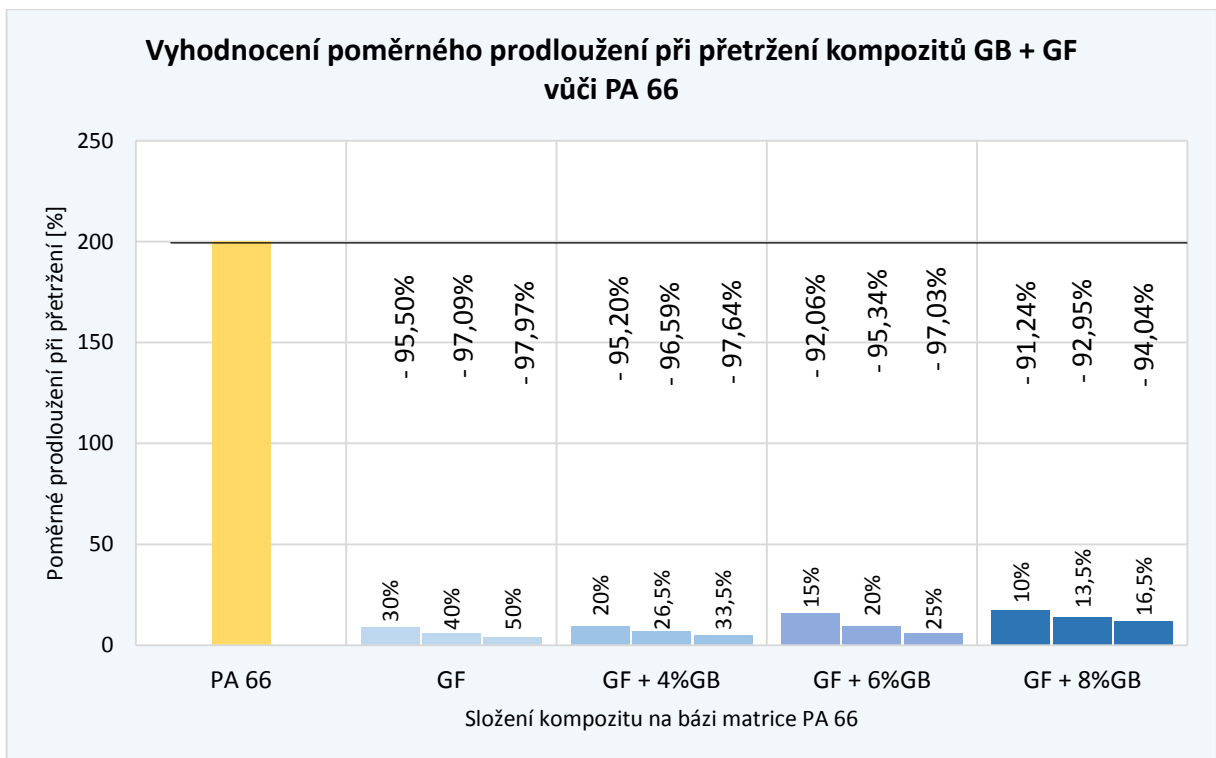


**Obr. P15** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 8 % skleněných dutých kuliček

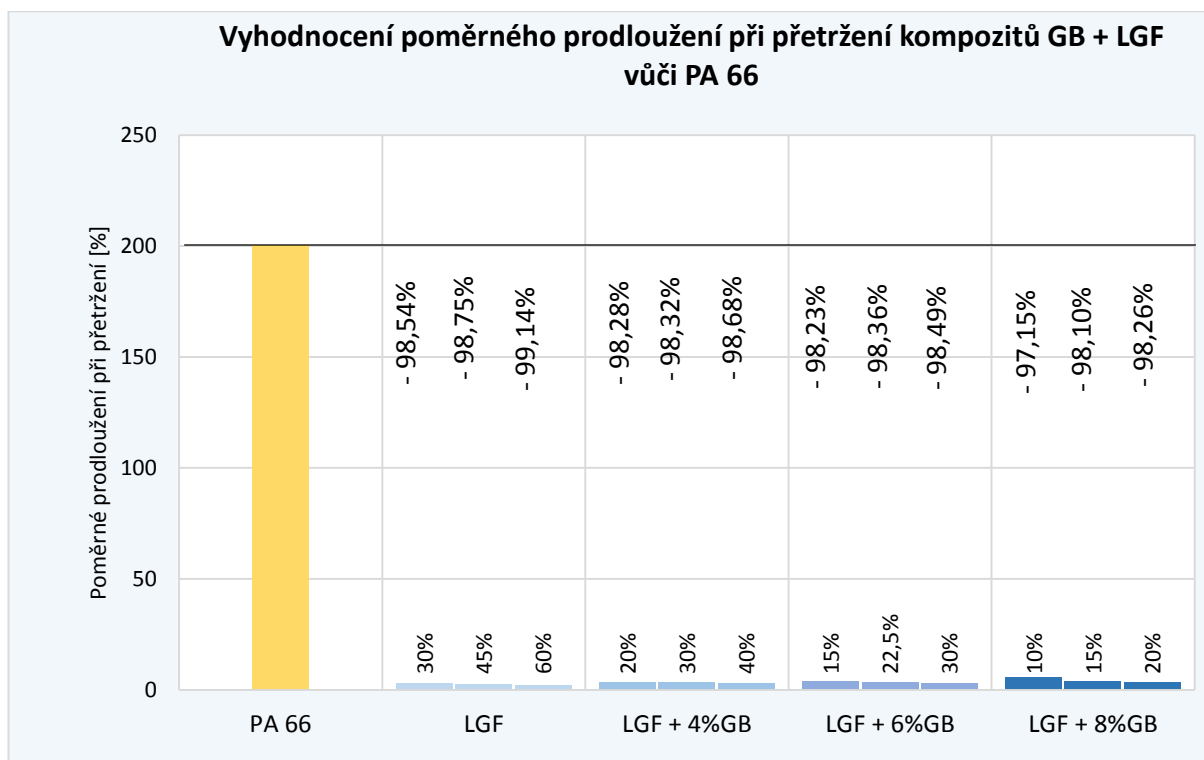




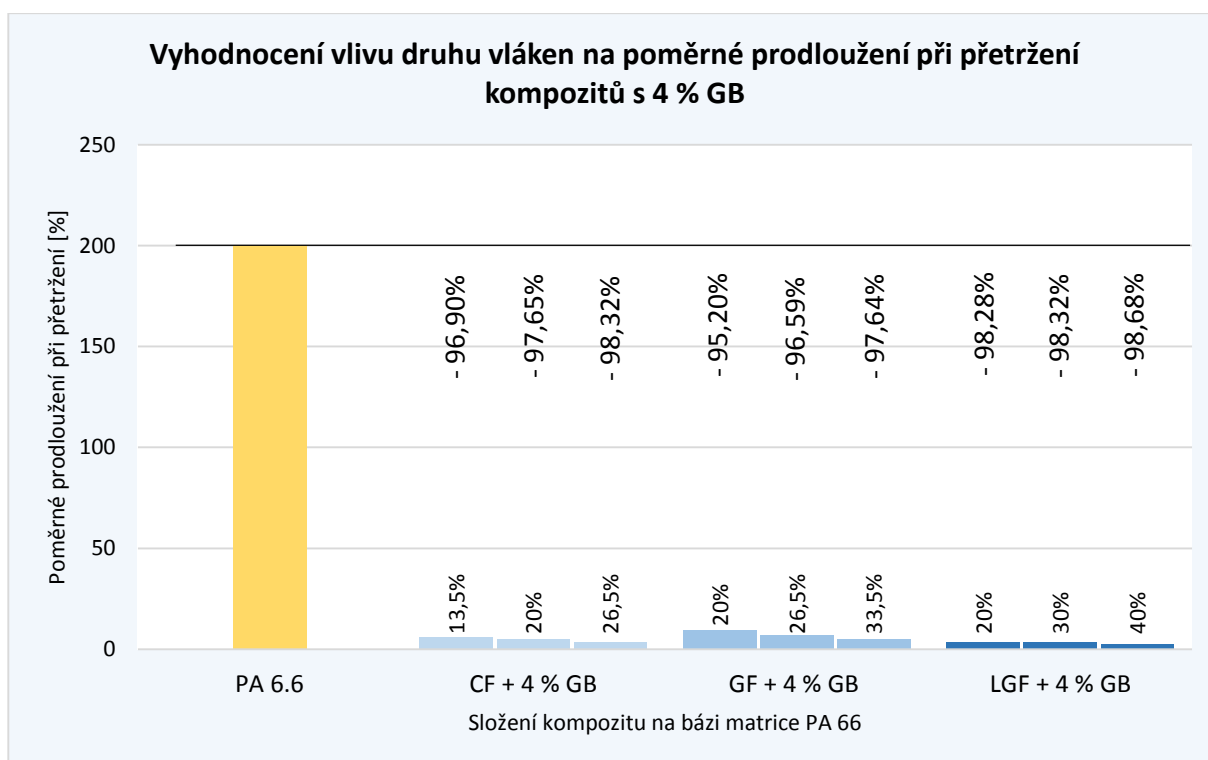
**Obr. P16** Vyhodnocení poměrného prodloužení při přetržení u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených uhlíkovými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



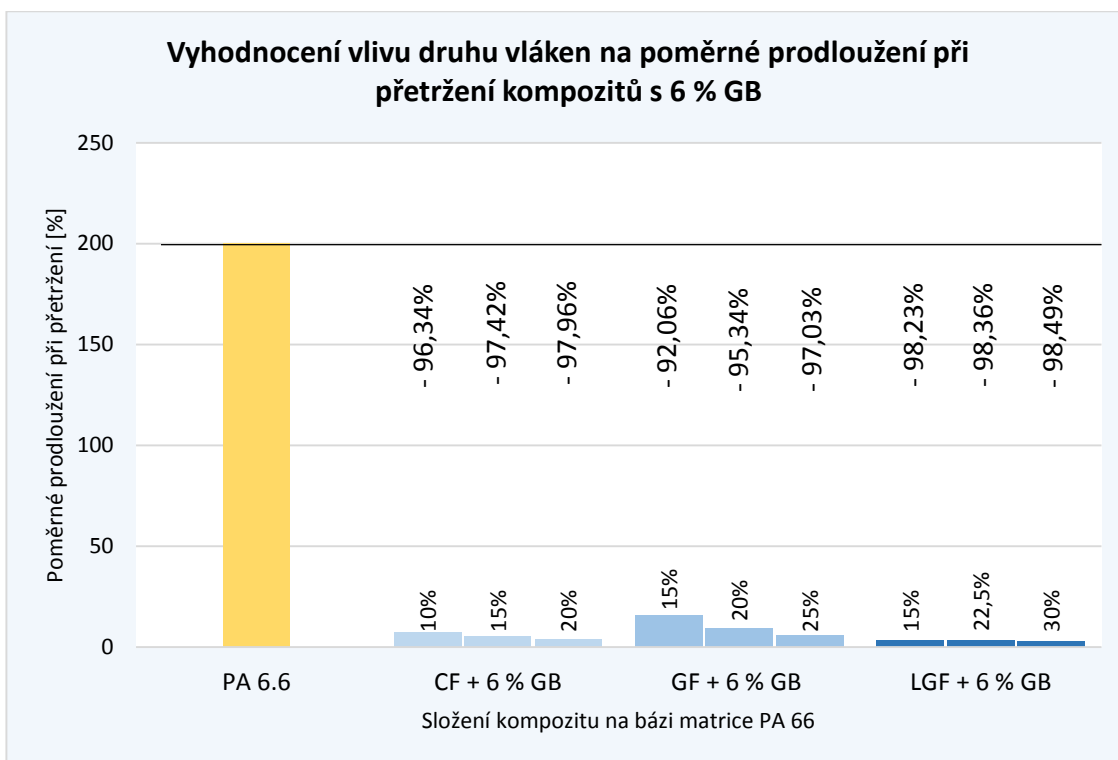
**Obr. P17** Vyhodnocení poměrného prodloužení při přetržení u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených krátkými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



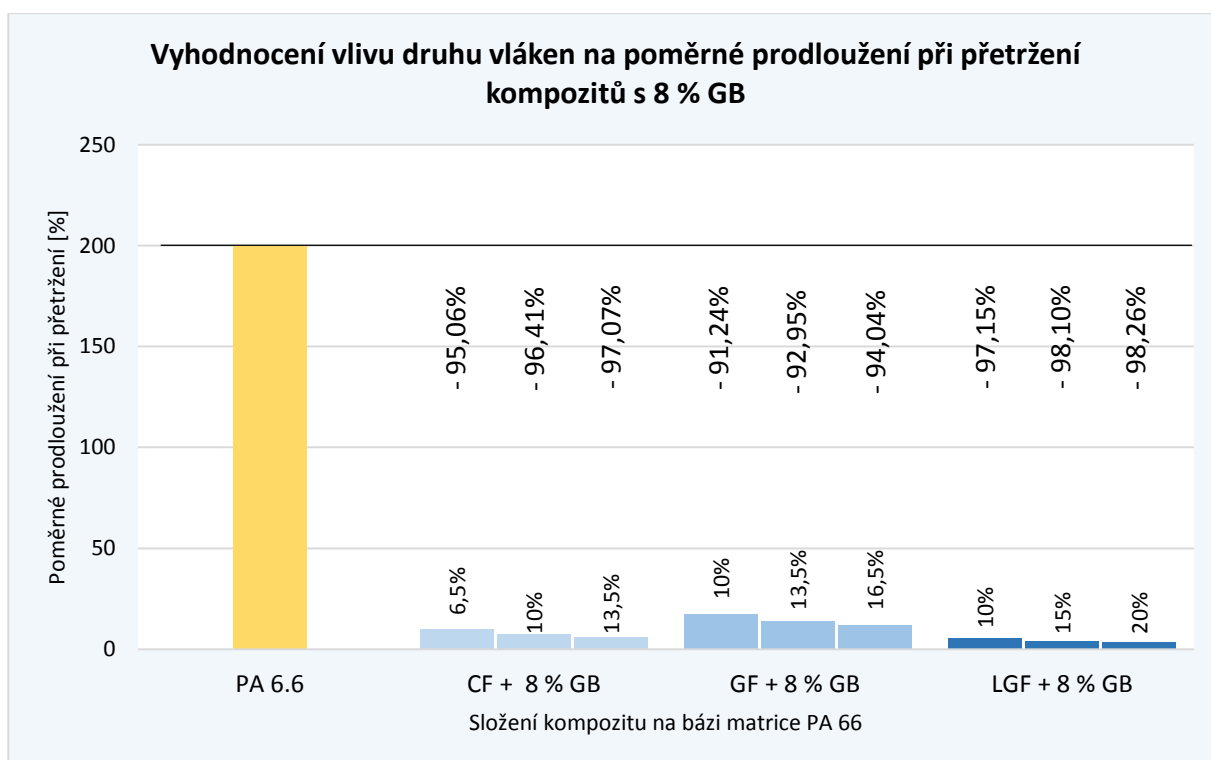
**Obr. P18** Vyhodnocení poměrného prodloužení při přetržení u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



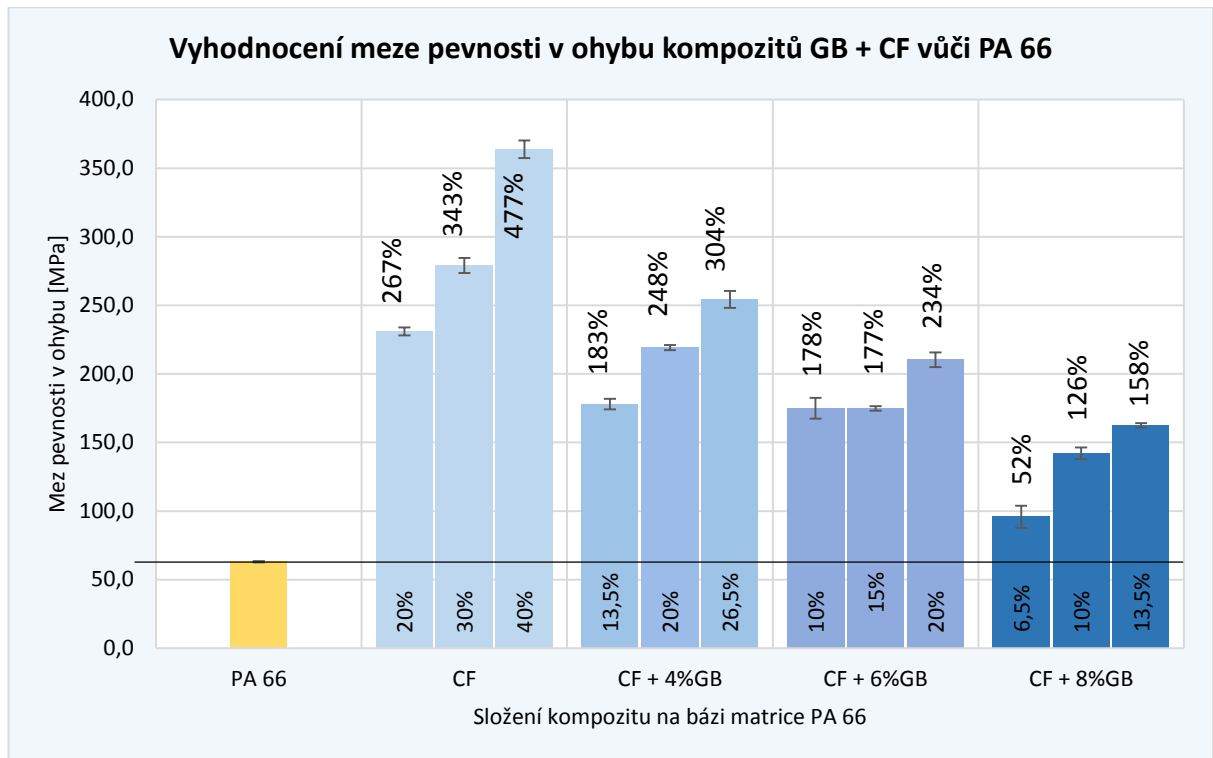
**Obr. P19** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 4 % skleněných dutých kuliček



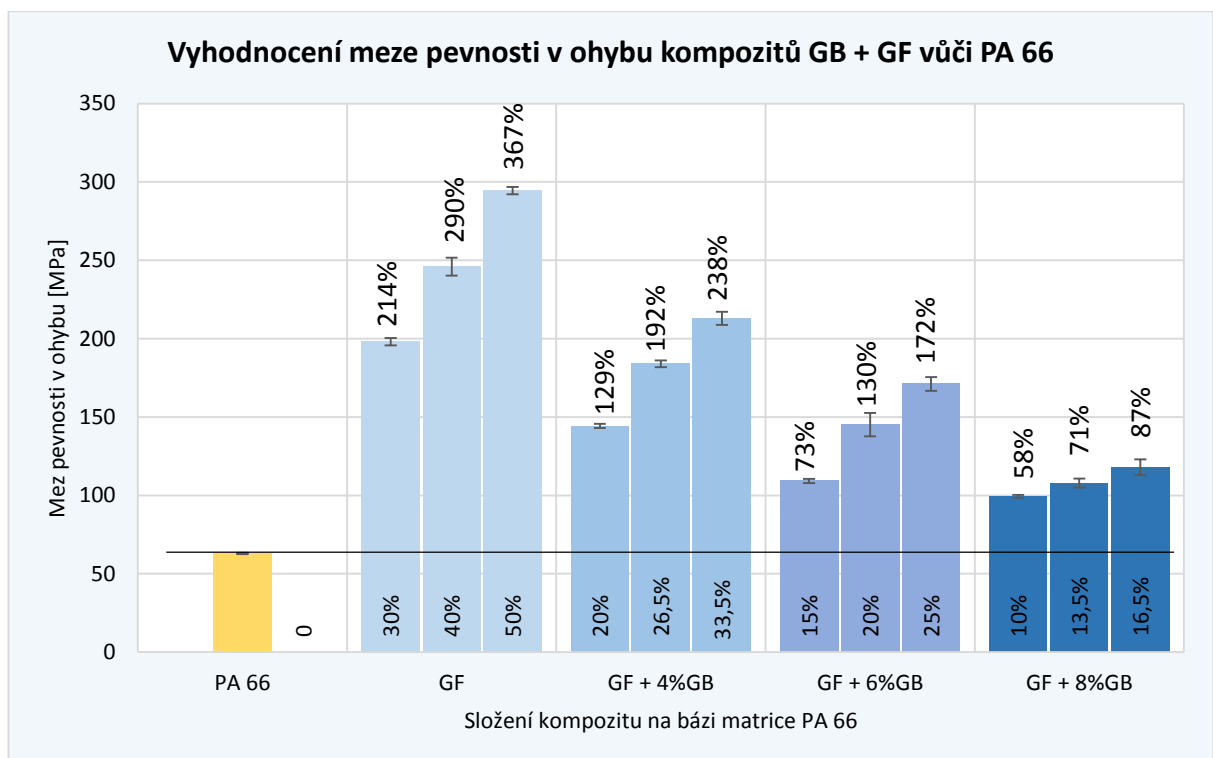
**Obr. P20** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 6 % skleněných dutých kuliček



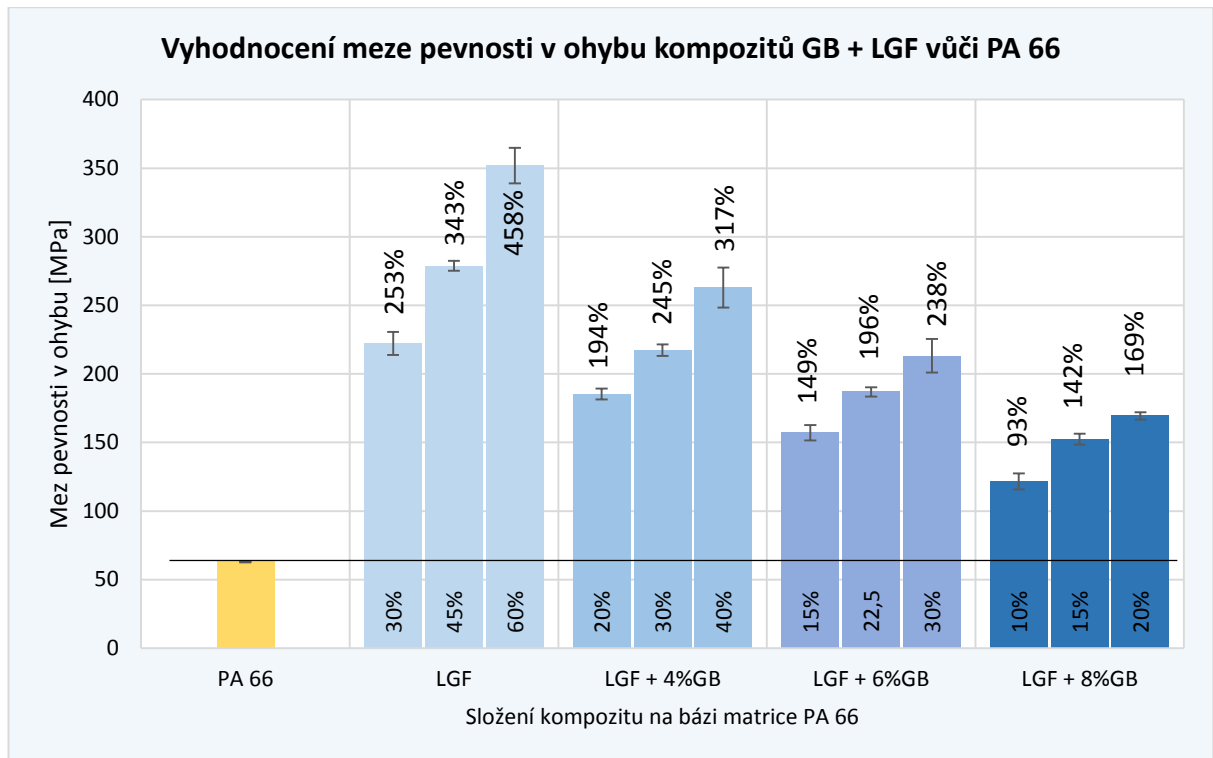
**Obr. P21** Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 8 % skleněných dutých kuliček



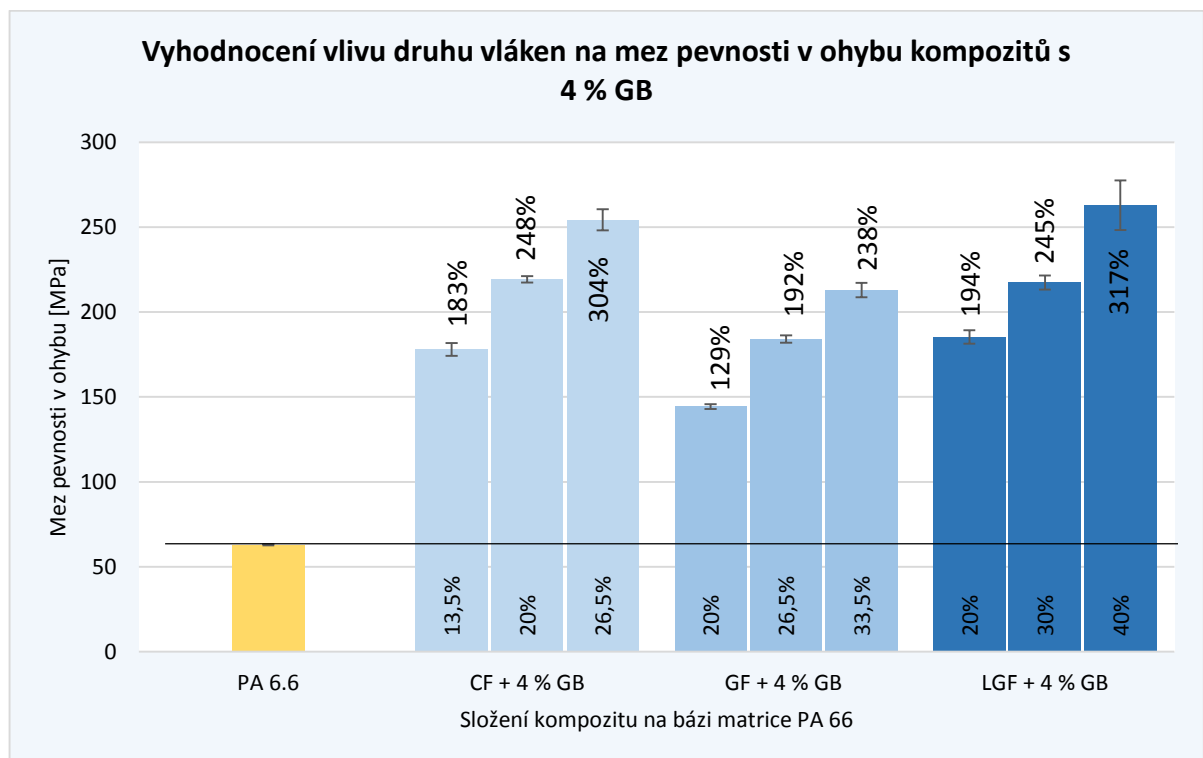
**Obr. P22** Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených uhlíkovými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



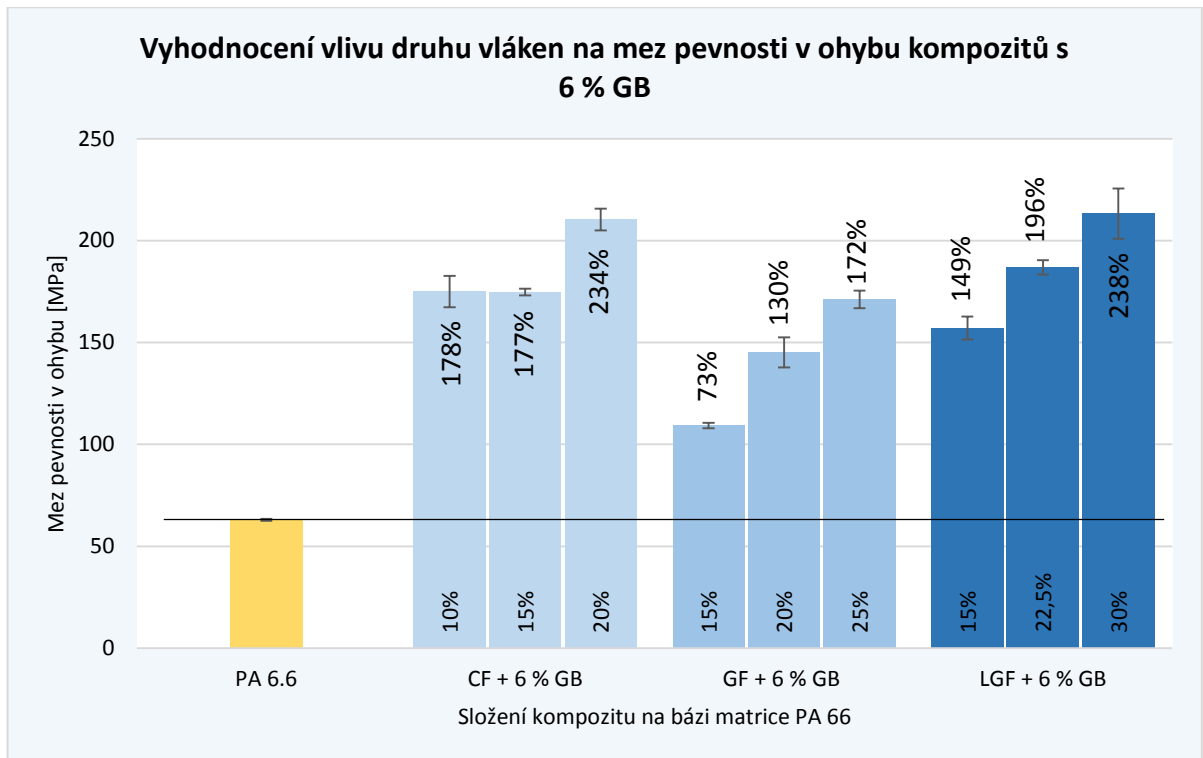
**Obr. P23** Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených krátkými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



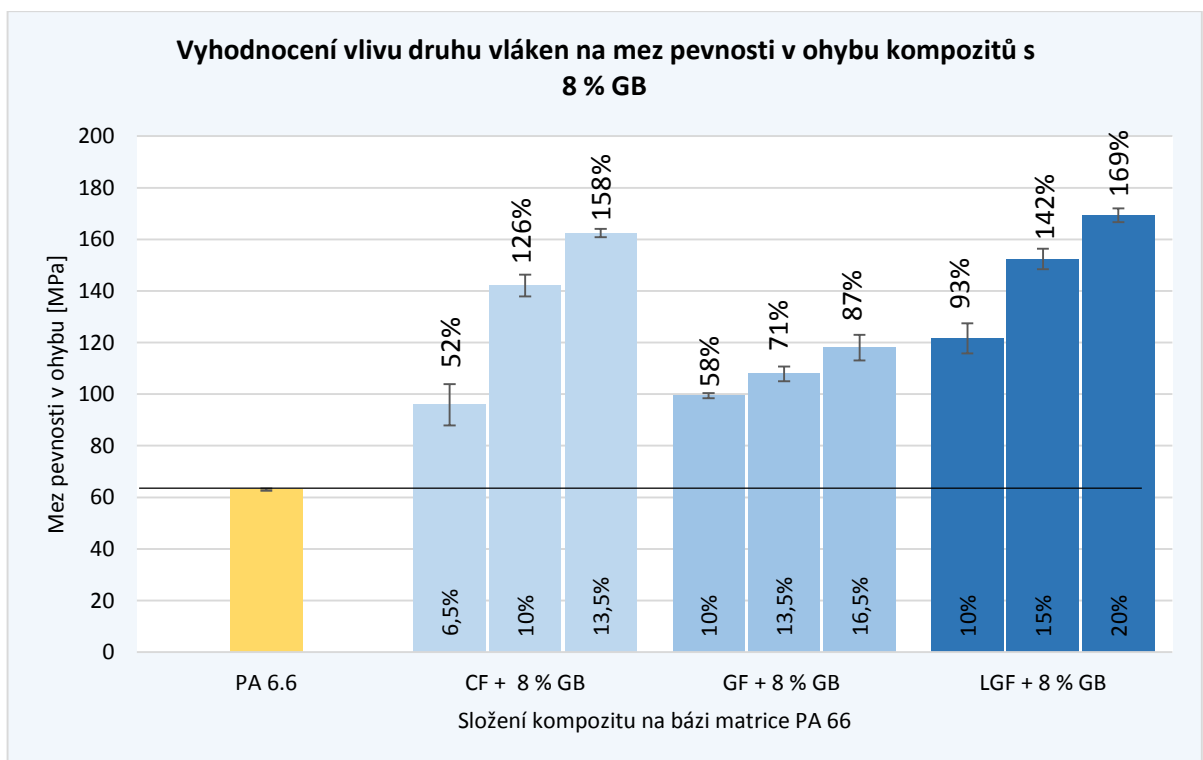
**Obr. P24** Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



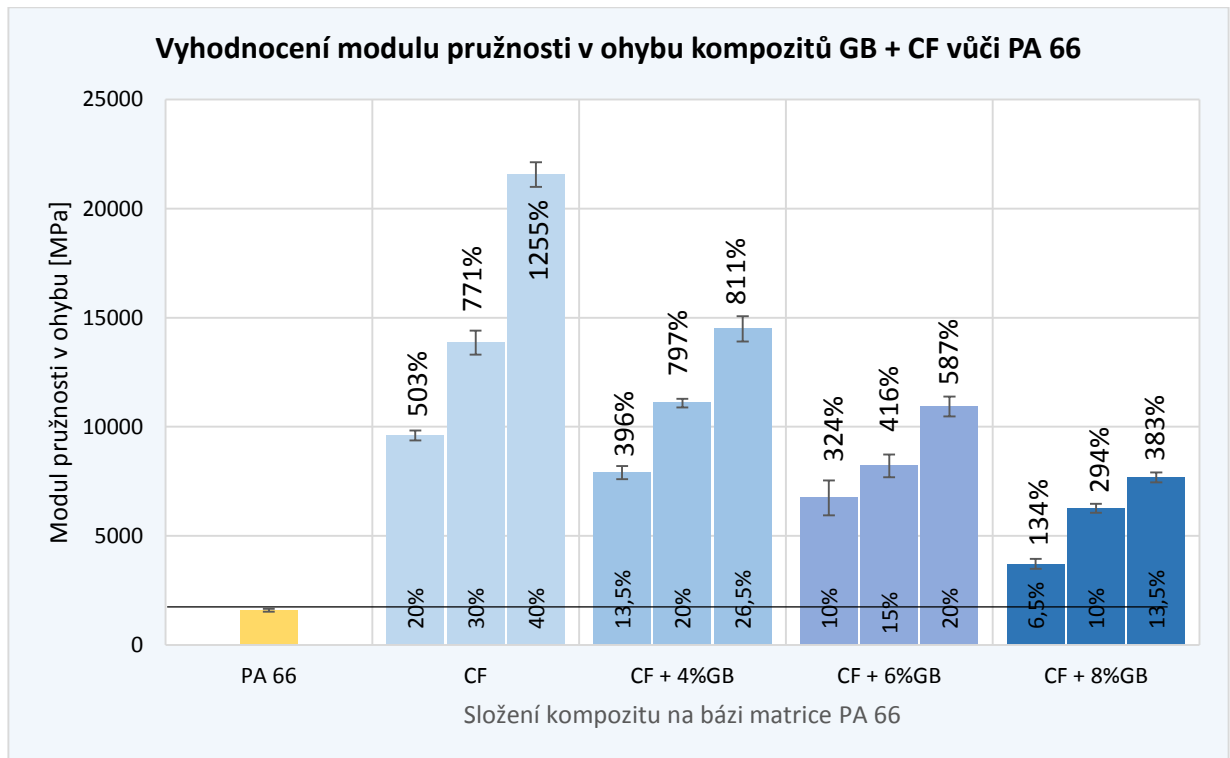
**Obr. P25** Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 4 % skleněných dutých kuliček



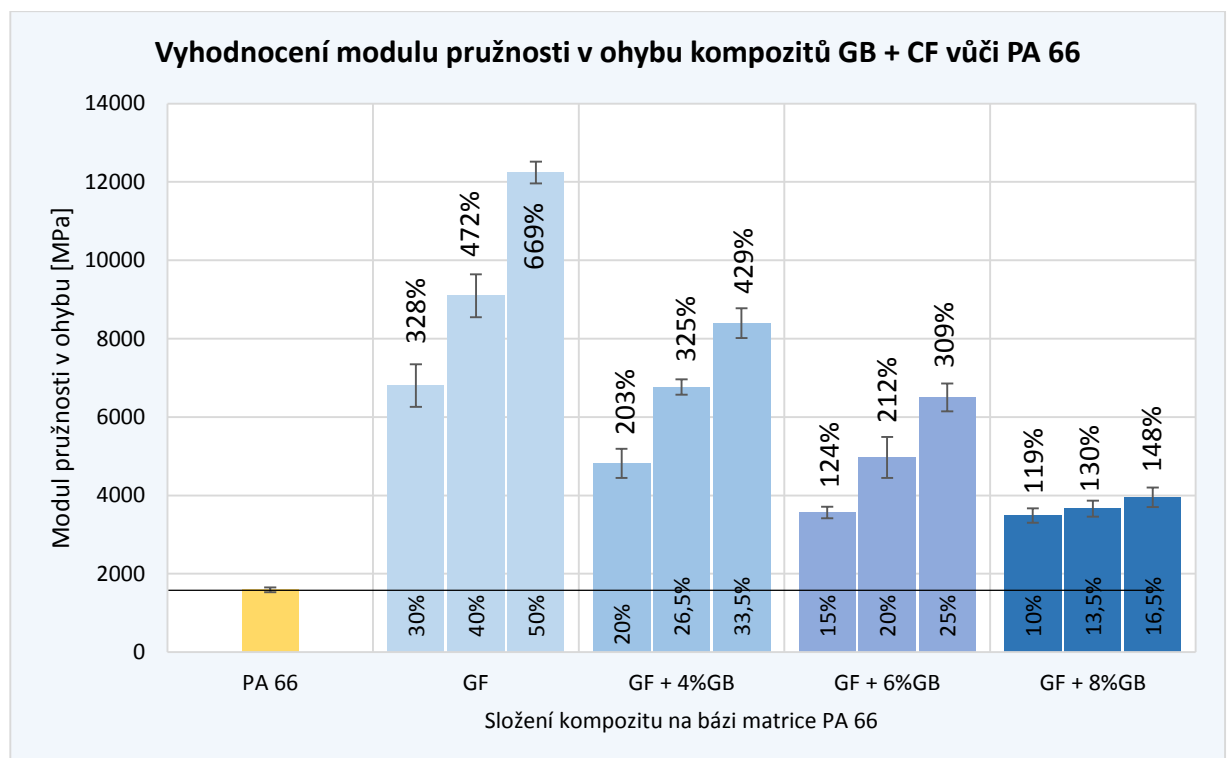
**Obr. P26** Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 6 % skleněných dutých kuliček



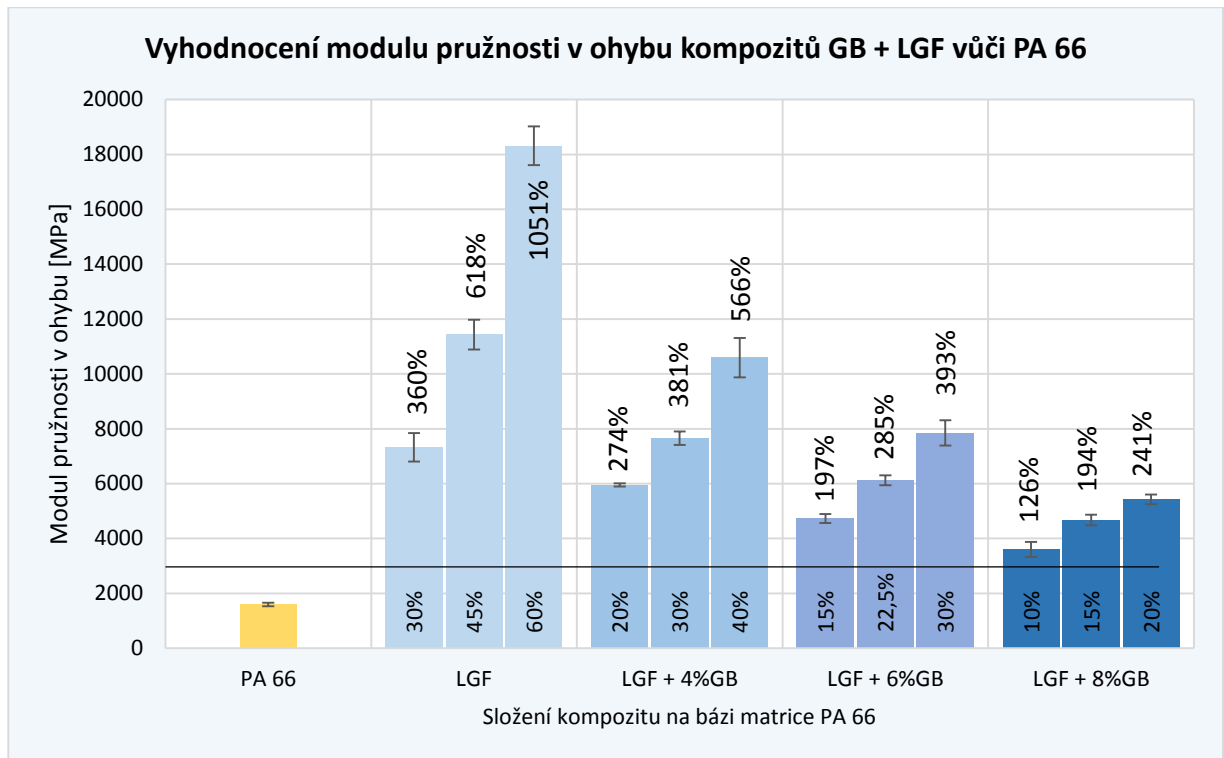
**Obr. P27** Vyhodnocení meze pevnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 8 % skleněných dutých kuliček



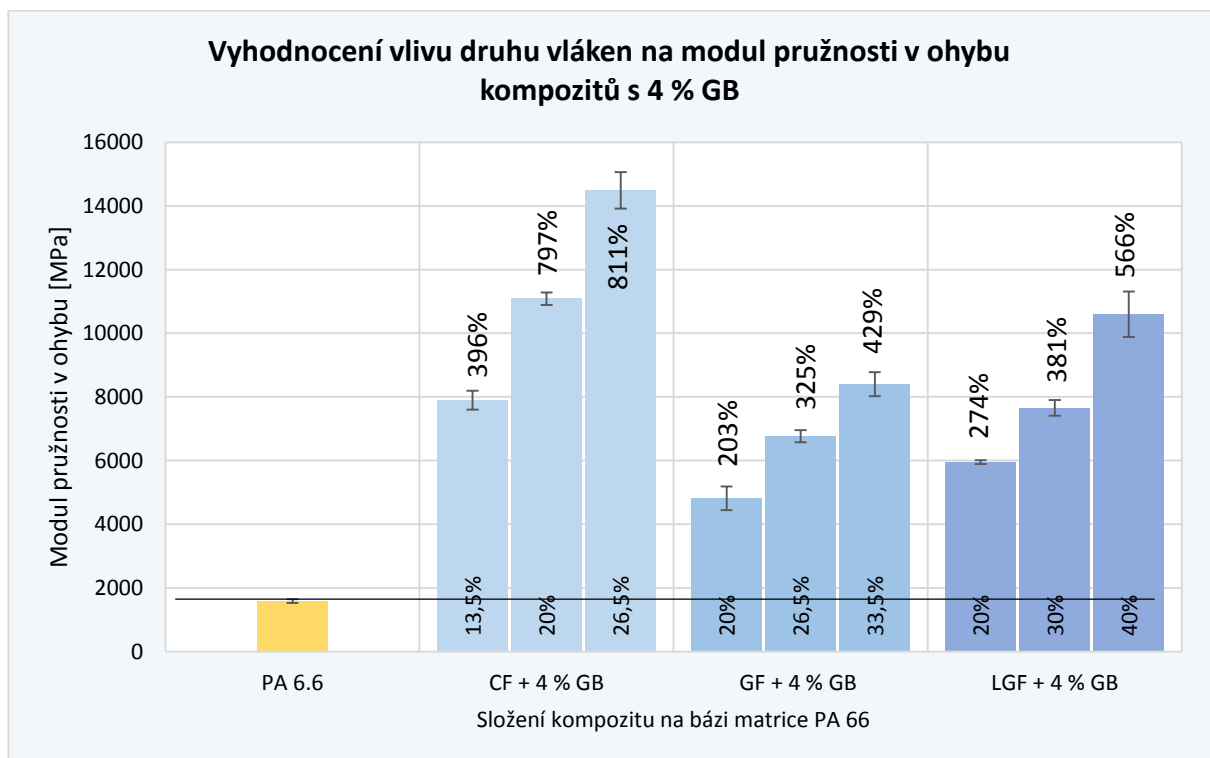
**Obr. P28** Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených uhlíkovými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



**Obr. P29** Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených krátkými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami

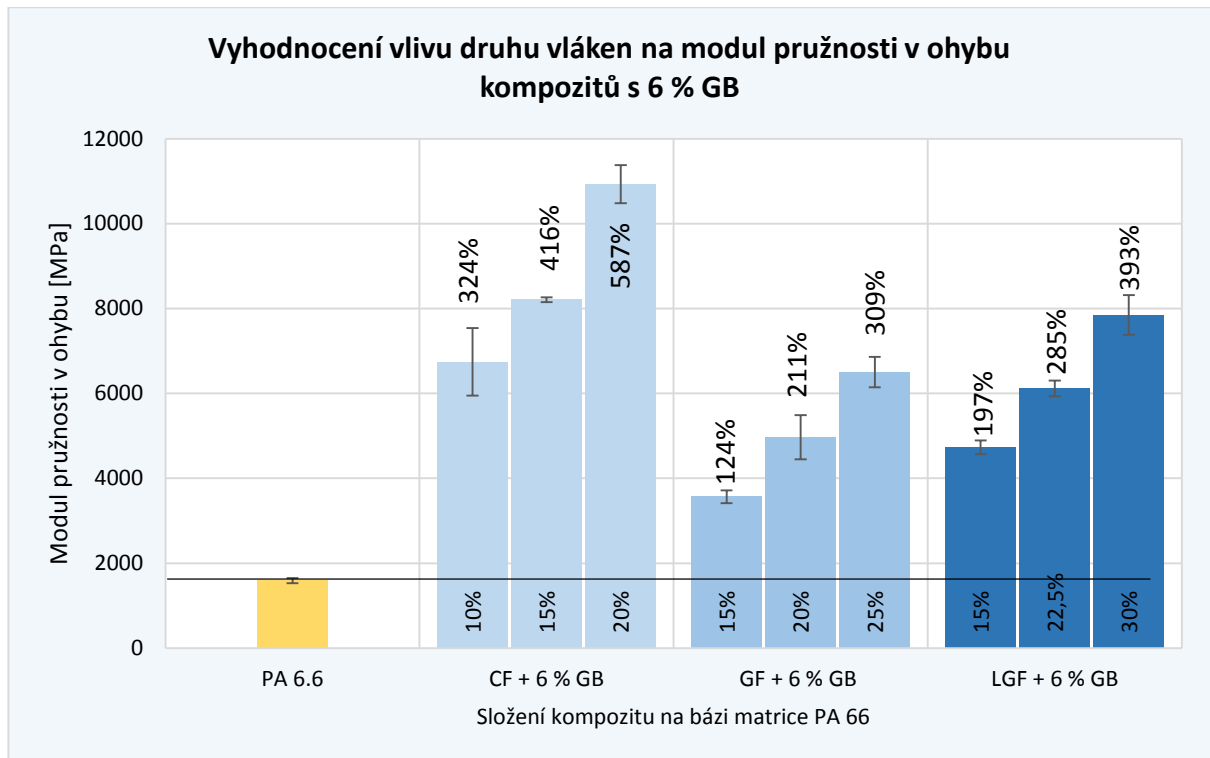


**Obr. P30** Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami

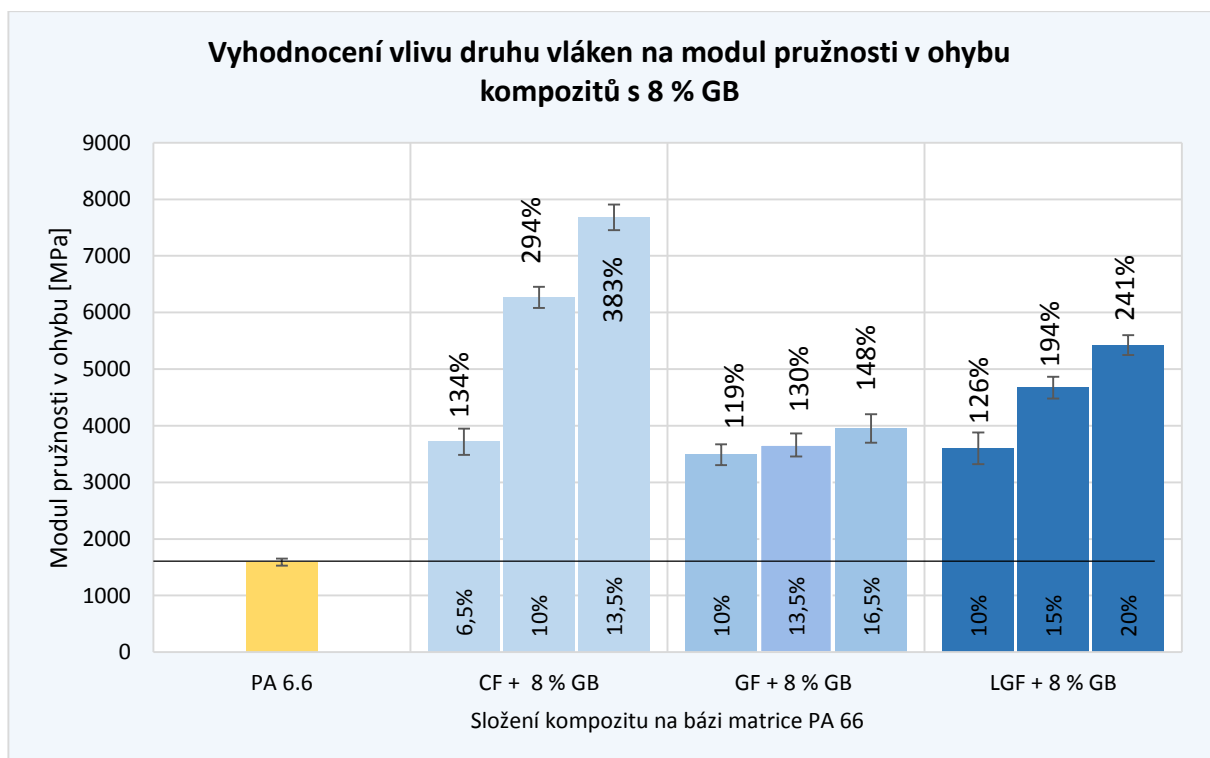


**Obr. P31** Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 4 % skleněných dutých kuliček

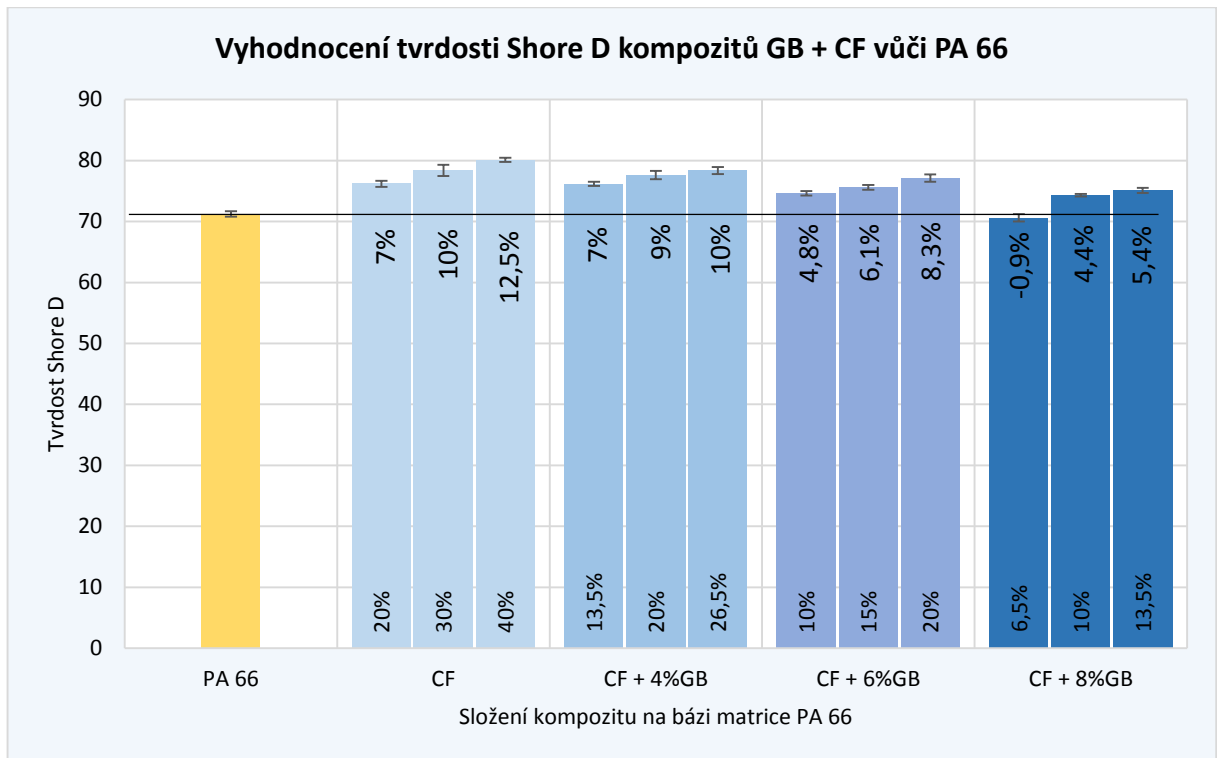




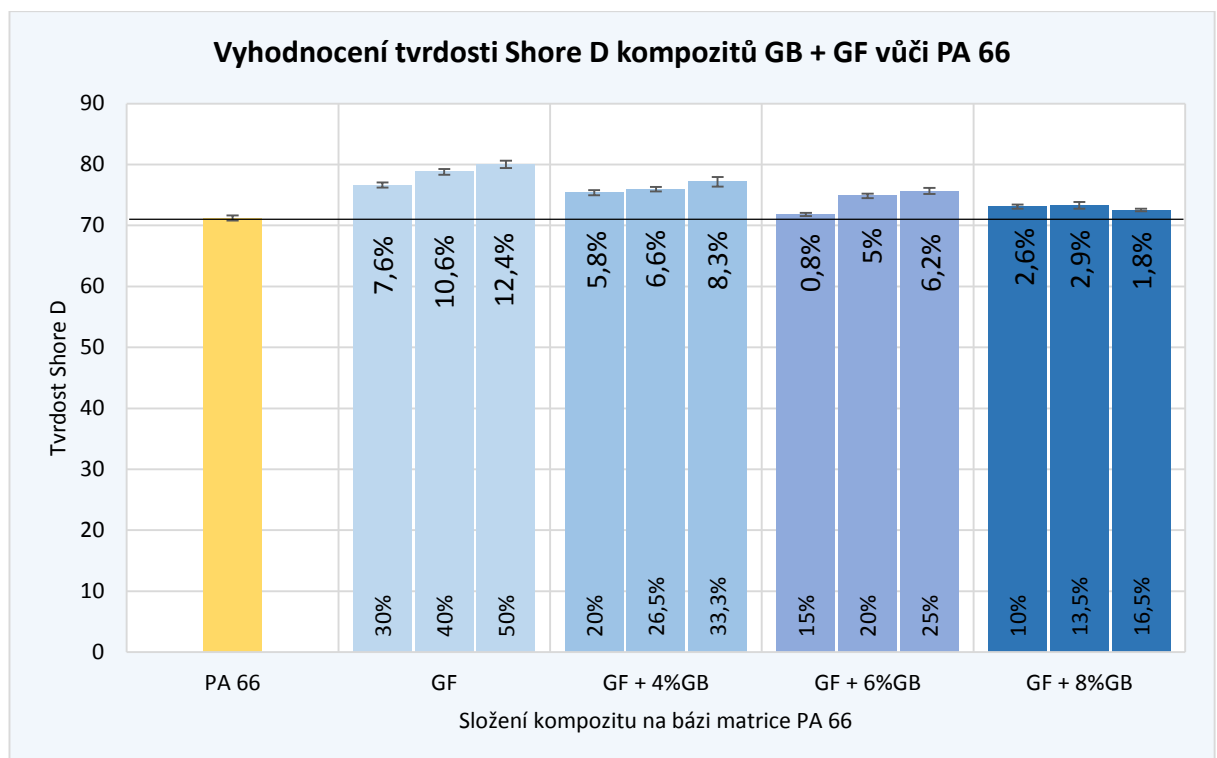
**Obr. P32** Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 6 % skleněných dutých kuliček



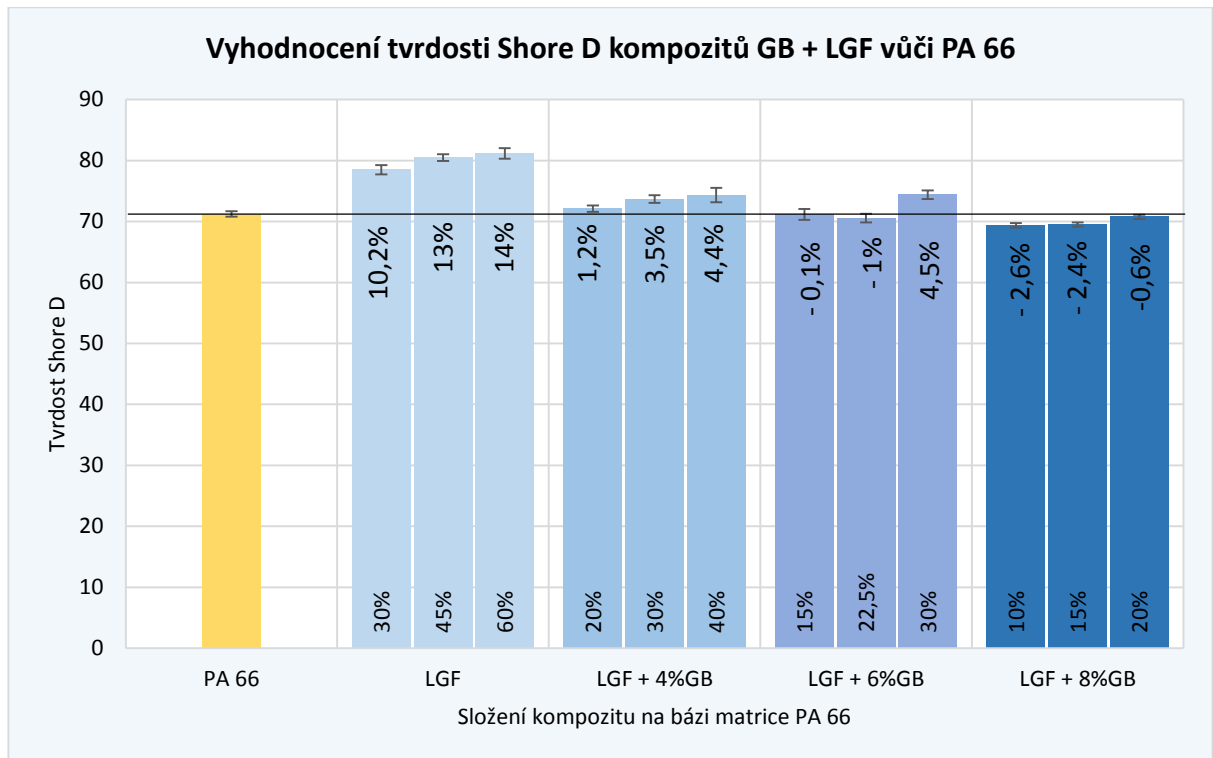
**Obr. P33** Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 8 % skleněných dutých kuliček



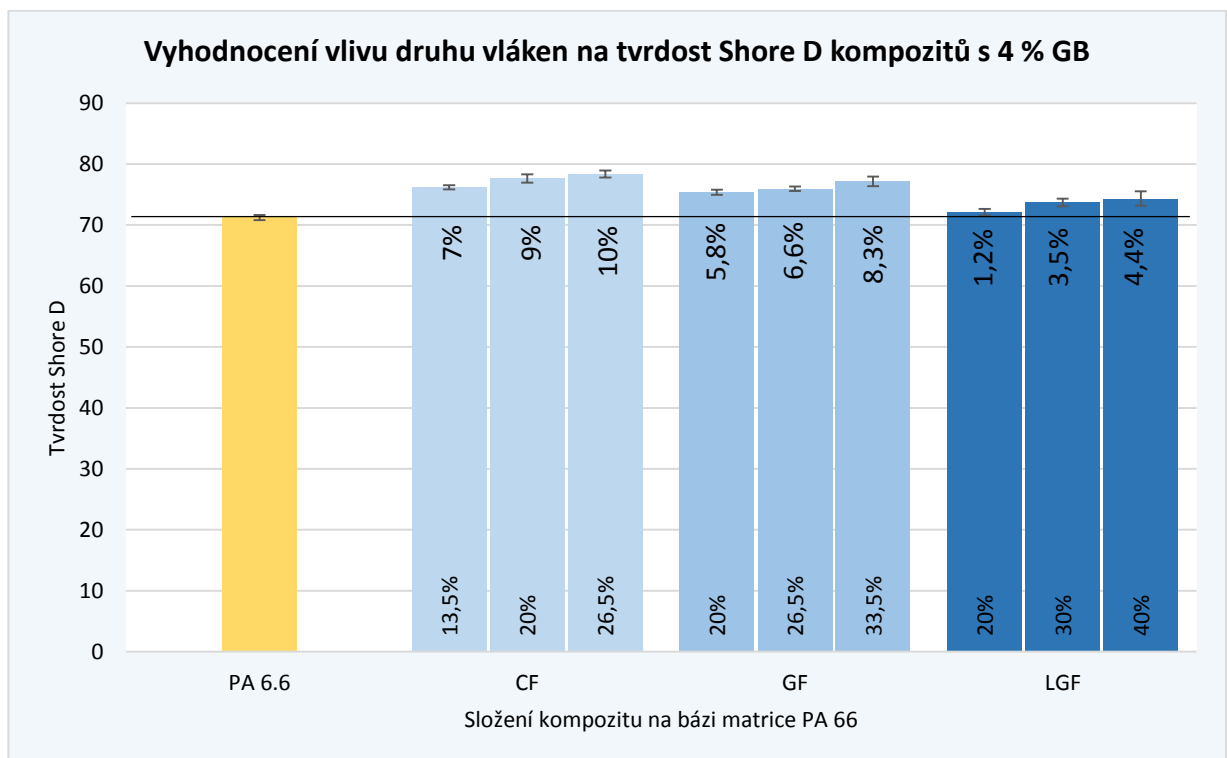
**Obr. P34** Vyhodnocení tvrdosti Shore D u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených uhlíkovými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



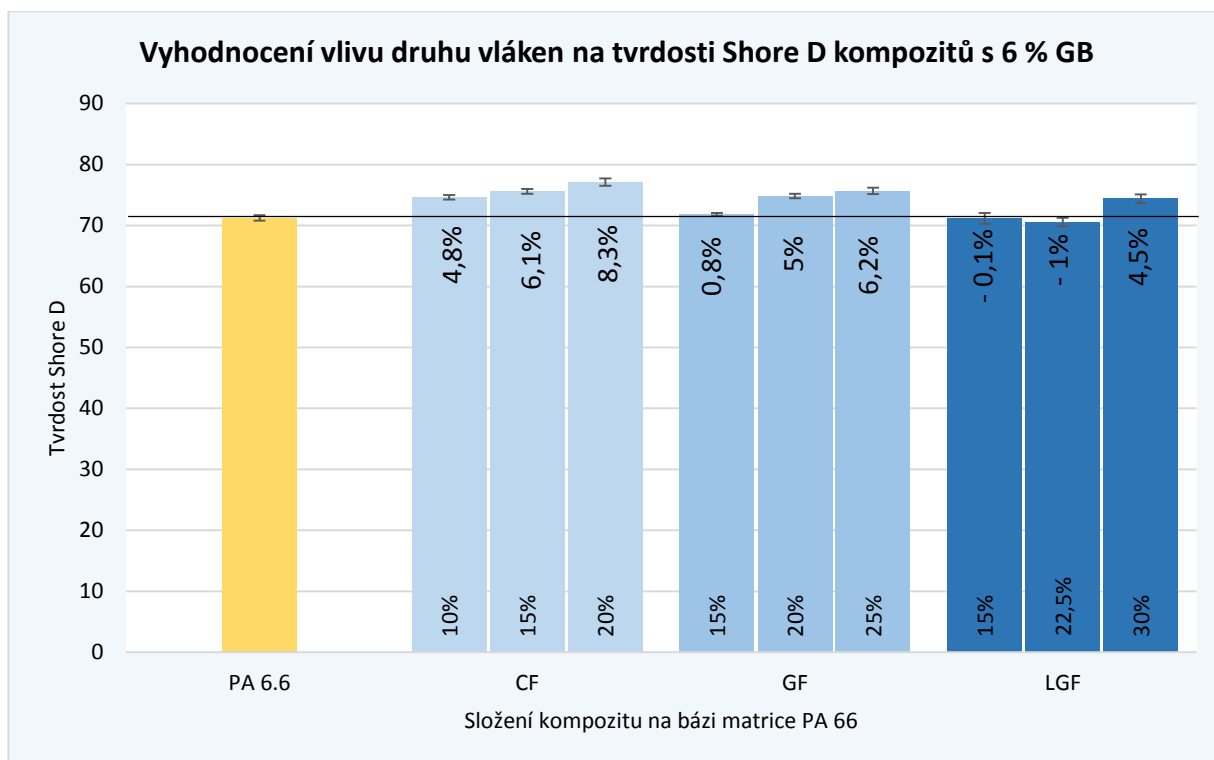
**Obr. P35** Vyhodnocení tvrdosti Shore D u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených krátkými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



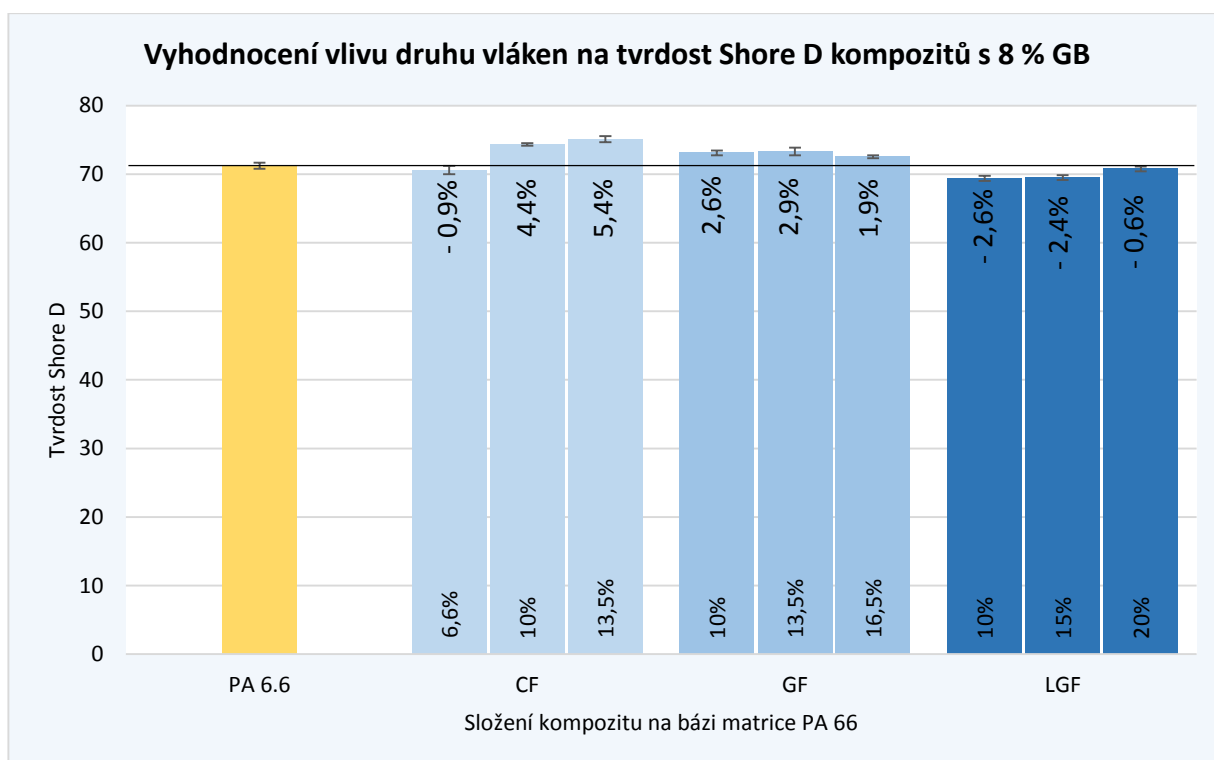
**Obr. P36** Vyhodnocení tvrdosti Shore D u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



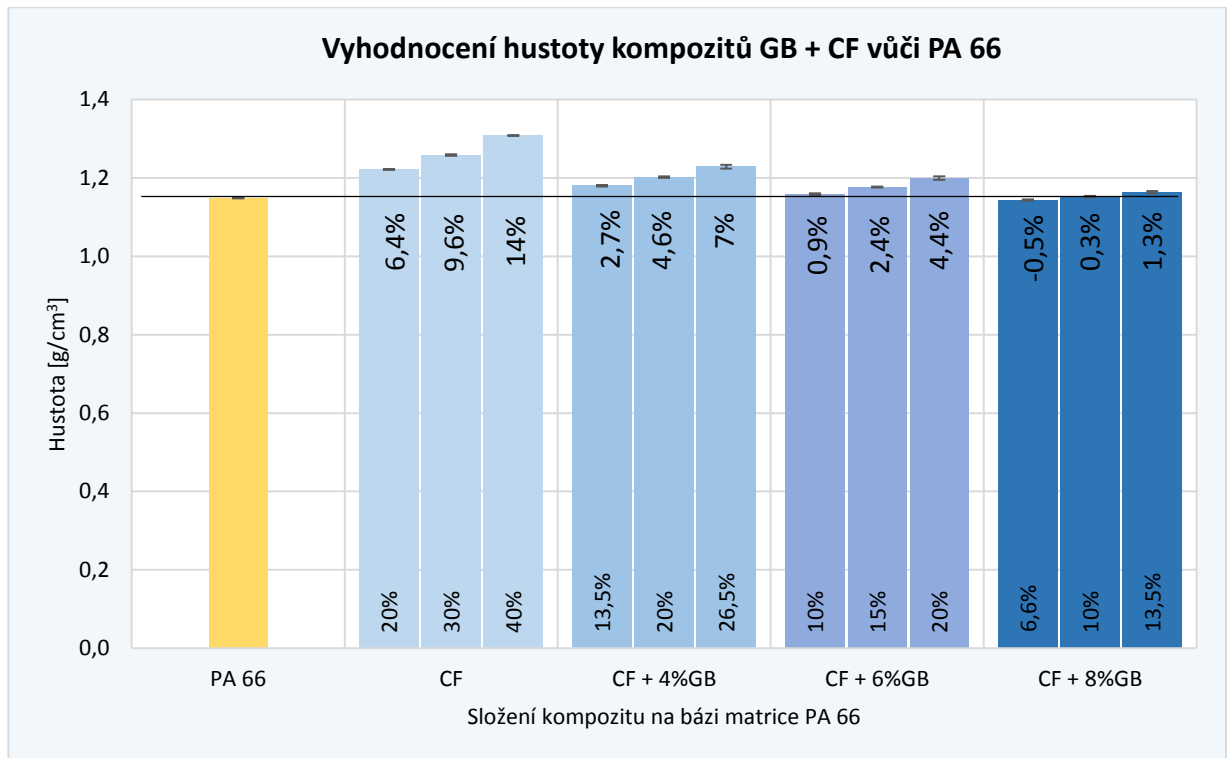
**Obr. P37** Vyhodnocení tvrdosti Shore D u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 4 % skleněných dutých kuliček



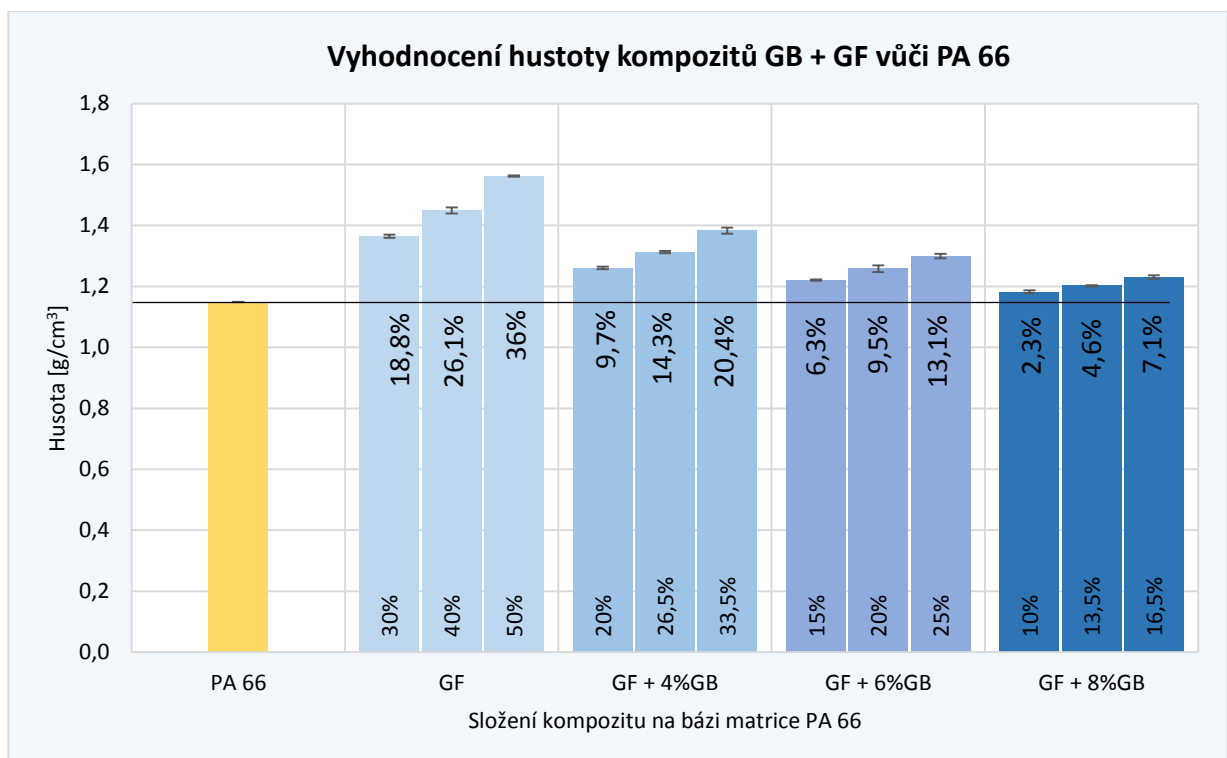
**Obr. P38** Vyhodnocení tvrdosti Shore D u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 6 % skleněných dutých kuliček



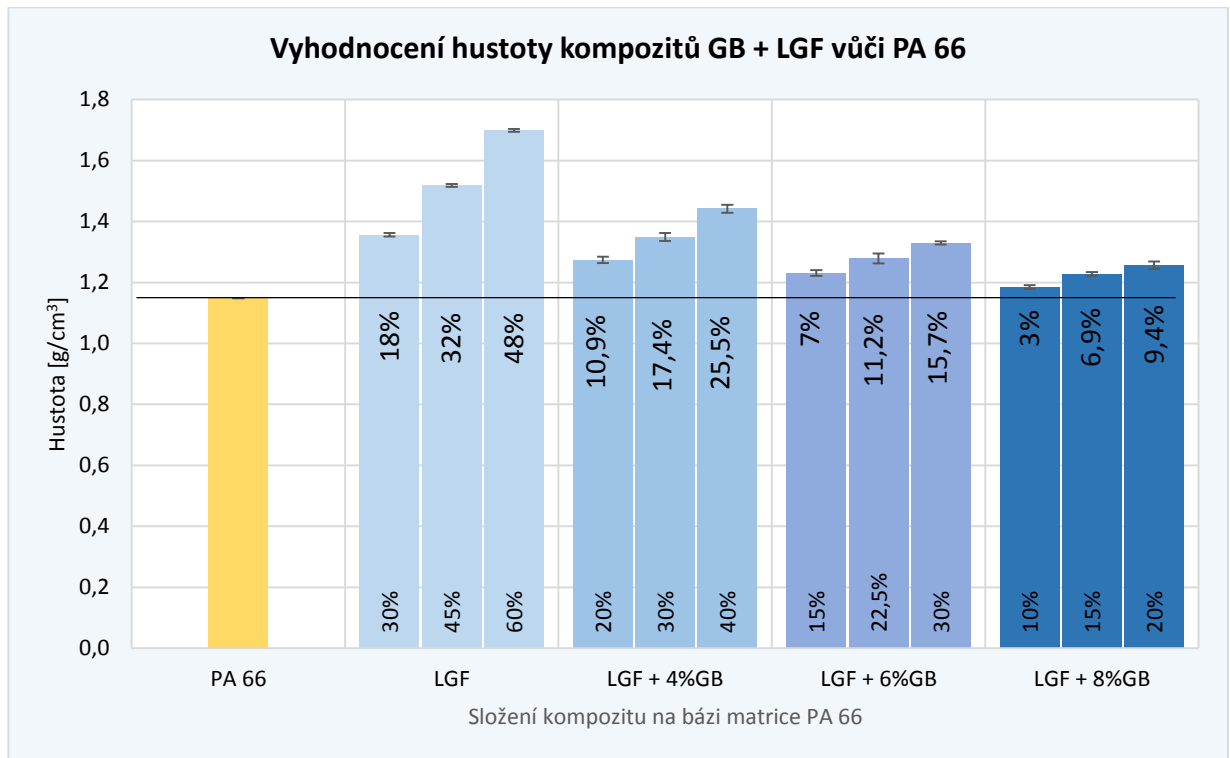
**Obr. P39** Vyhodnocení tvrdosti Shore D u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 8 % skleněných dutých kuliček



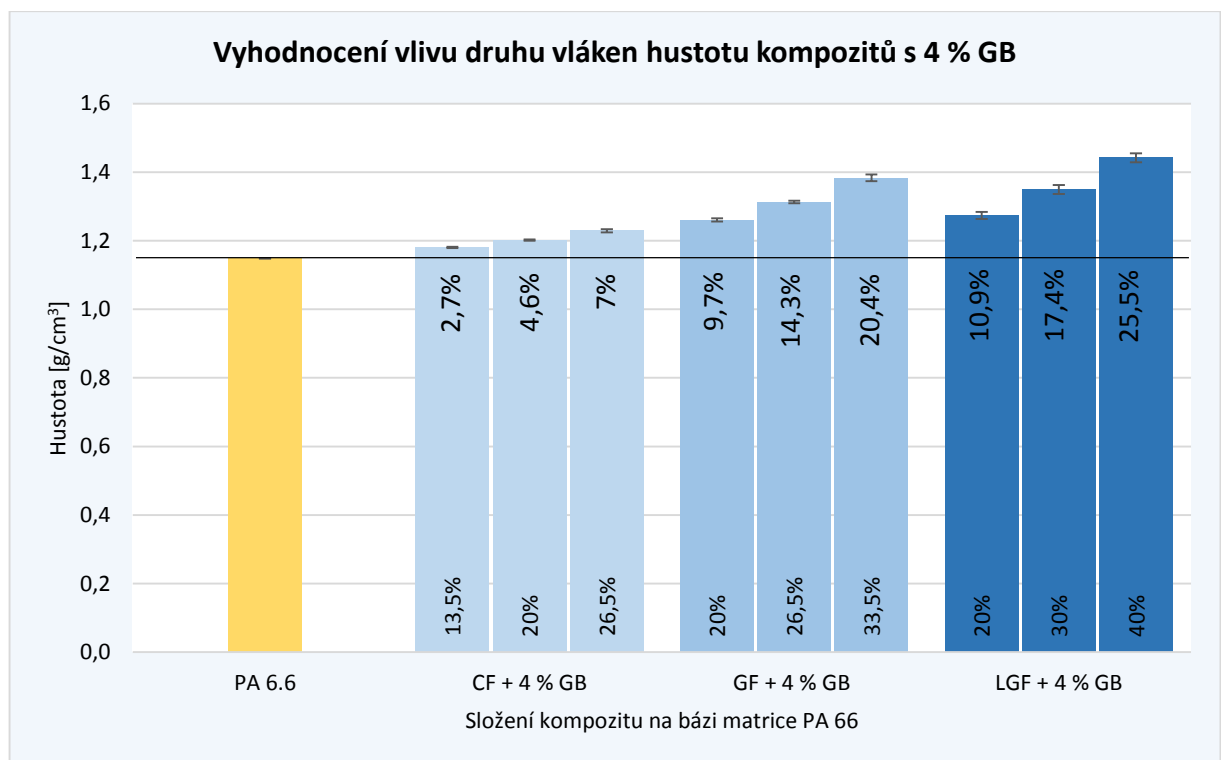
**Obr. P40** Vyhodnocení hustoty u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených uhlíkovými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



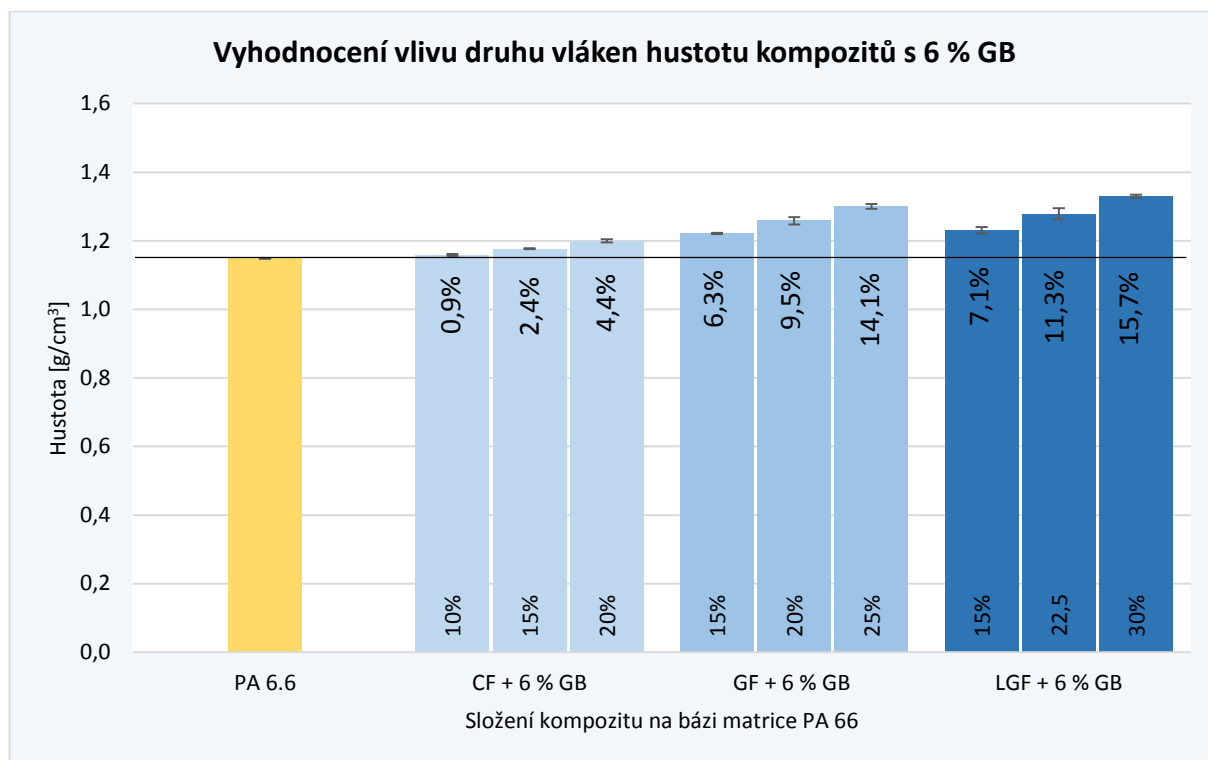
**Obr. P41** Vyhodnocení hustoty u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených krátkými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



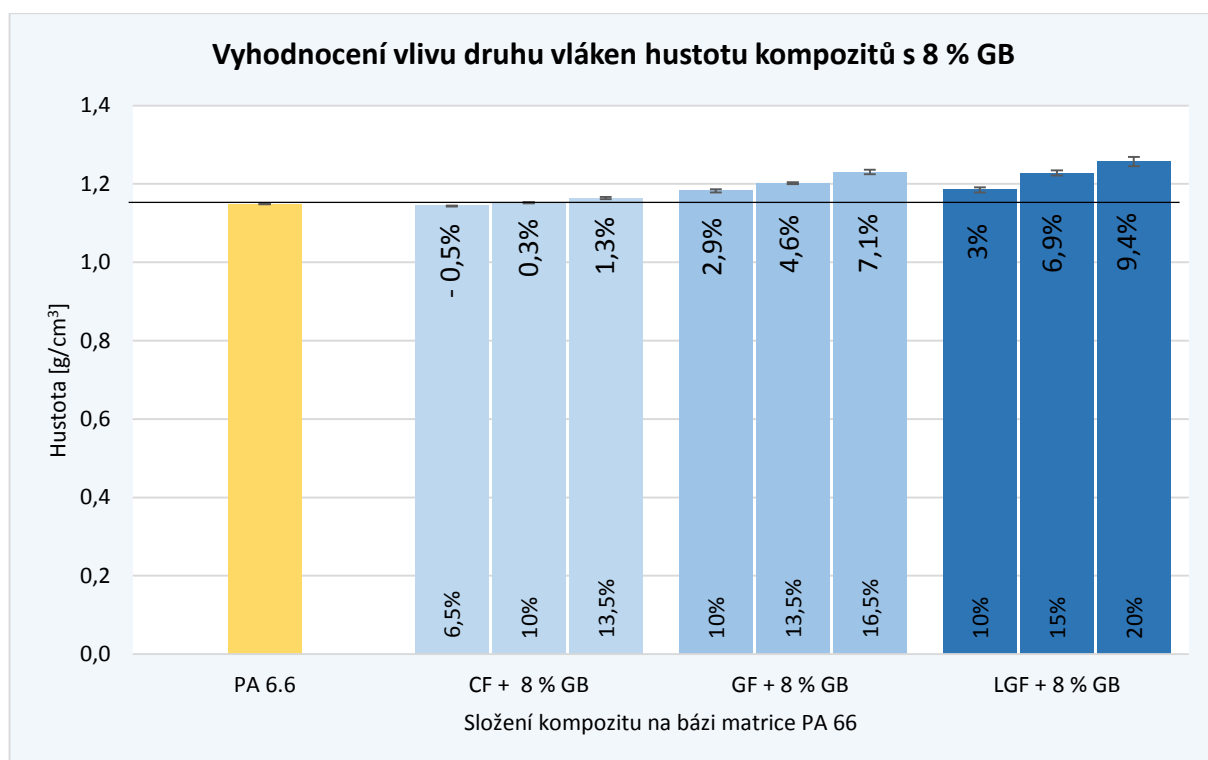
**Obr. P42** Vyhodnocení hustoty u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených dlouhými skleněnými vlákny a skleněnými dutými kuličkami



**Obr. P43** Vyhodnocení hustoty u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 4 % skleněných dutých kuliček



**Obr. P44** Vyhodnocení hustoty u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 6 % skleněných dutých kuliček




**Obr. P45** Vyhodnocení hustoty u kompozitů na bázi matrice PA 66 vyztužených 3 druhy vláken a 8 % skleněných dutých kuliček

## Příloha č. 5: Materiálový list PA 66

Distributed by 

Thursday, April 23, 2015

<b>TECHNYL® A 218 BLACK 21 N</b>		Units <input type="text" value="SI"/>
Solvay Engineering Plastics - Polyamide 66		
<b>Action</b>		<b>Legend (Open)</b>
 		

### General Information

#### Product Description

TECHNYL® A 218 Black 21 N is an unreinforced polyamide 66, standard viscosity, heat stabilized for injection moulding. It is available in black color.

#### General

Material Status	• Commercial: Active		
Availability	• Africa & Middle East	• Europe	• Latin America
Additive	• Heat Stabilizer		
Features	• Good Chemical Resistance	• Heat Stabilized	• High Heat Resistance
Agency Ratings	• UU 453/2010/EC		
RoHS Compliance	• RoHS Compliant		
Automotive Specifications	• FORD WSK-M4D648-A • GM GMP.PA66.018 Color: Black	• GM GMP.PA66.018 Color: Natural • GM GMW15702-110025 Color: Natural	
Appearance	• Black		
Processing Method	• Injection Molding		
Multi-Point Data	• Isothermal Stress vs. Strain (ISO 11403-1)	• Secant Modulus vs. Strain (ISO 11403-1)	• Viscosity vs. Shear Rate (ISO 11403-2)
Part Marking Code (ISO 11469)	• >PA66<		

### ASTM & ISO Properties <sup>1</sup>

Physical	Dry	Conditioned	Unit	Test Method
Density	1.14	--	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183/A
Molding Shrinkage				Internal Method
Across Flow	1.9	--	%	
Flow	1.9	--	%	
Water Absorption (23°C, 24 hr)	1.3	--	%	ISO 62
Molding Shrinkage Isotropy	1.00	--		Internal Method
Mechanical	Dry	Conditioned	Unit	Test Method
Tensile Modulus	3000	1500	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile Strength (Yield)	85.0	--	MPa	ASTM D638
Tensile Stress (Yield)	90.0	60.0	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile Stress (Break)	55.0	40.0	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile Strain (Yield)	4.0	10	%	ISO 527-2/1A
Tensile Elongation (Break)	30	--	%	ASTM D638
Tensile Strain (Break)	50	200	%	ISO 527-2/1A
Flexural Modulus	3300	--	MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	3000	1300	MPa	ISO 178
Flexural Strength	125	--	MPa	ASTM D790
Flexural Stress	120	70.0	MPa	ISO 178
Impact	Dry	Conditioned	Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength (23°C)	4.5	10	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy Unnotched Impact Strength (23°C)	No Break	No Break		ISO 179/1eU
Notched Izod Impact	80	--	J/m	ASTM D256
Notched Izod Impact Strength (23°C)	4.0	10	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Unnotched Izod Impact Strength	No Break	No Break		ISO 180
Thermal	Dry	Conditioned	Unit	Test Method
Deflection Temperature Under Load (0.45 MPa, Unannealed)	220	--	°C	ASTM D648



Heat Deflection Temperature (0.45 MPa, Unannealed)	200	--	°C	ISO 75-2/Bf
Heat Deflection Temperature (1.8 MPa, Unannealed)	82.0	--	°C	ISO 75-2/Af
Melting Temperature	263	--	°C	ISO 11357-3
CLTE - Flow (23 to 85°C)	7.0E-5	--	cm/cm/°C	ISO 11359-2
<b>Electrical</b>	<b>Dry</b>	<b>Conditioned</b>	<b>Unit</b>	<b>Test Method</b>
Surface Resistivity	1.0E+15	1.0E+13	ohm	IEC 60093
Volume Resistivity	1.0E+15	1.0E+14	ohm·cm	IEC 60093
Electric Strength	25	22	kV/mm	IEC 60243-1
Relative Permittivity	2.90	3.20		IEC 60250
Dissipation Factor	0.030	0.080		IEC 60250
Comparative Tracking Index				IEC 60112
Solution A	600	600	V	
Solution B	350	--	V	
<b>Flammability</b>	<b>Dry</b>	<b>Conditioned</b>	<b>Unit</b>	<b>Test Method</b>
Flame Rating				UL 94
1.60 mm	V-2	--		
3.20 mm	V-2	--		
Glow Wire Flammability Index (1.60 mm)	650	--	°C	IEC 60695-2-12
Oxygen Index	26	--	%	ISO 4589-2

### Processing Information

<b>Injection</b>	<b>Dry</b>	<b>Unit</b>
Drying Temperature	80.0	°C
Suggested Max Moisture	0.20	%
Rear Temperature	265 to 275	°C
Middle Temperature	270 to 280	°C
Front Temperature	280 to 290	°C
Mold Temperature	60.0 to 80.0	°C

### Notes

<sup>1</sup> Typical properties: these are not to be construed as specifications.

Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Seller assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**