



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLA DÍLŮ REALIZOVANÝCH 3D TISKEM

MECHANICAL PROPERTIES OF 3D PRINTED PLA PLASTIC PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ivan Novosád

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2018



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Ivan Novosád**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Mechanické vlastnosti PLA dílů realizovaných 3D tiskem**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Mechanické vlastnosti plastů používaných pro 3D technologii FDM se mohou lišit dle dodavatele, barevného pigmentu a aditiv. Nalezení vhodného materiálu s vysokými mechanickými vlastnostmi je zásadní pro použití v prototypové výrobě. Zároveň jsou stejně tak důležité procesní parametry při samotné stavbě 3D tiskem.

Typ práce: výzkumná

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je analýza mechanických vlastností PLA materiálu zpracovávaného technologií 3D tisku FDM.

Díličí cíle bakalářské práce:

- definice parametrů pro výrobu vzorků,
- návrh experimentu pro zjištění mechanických vlastností,
- experimenty a sběr dat,
- vyhodnocení a stanovení závěrů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

### **Seznam doporučené literatury:**

DRUMM, Brook, et al. Make: 3D printing projects. First edition. San Francisco: Maker Media, 2015, xvii, 263 stran : barevné fotografie. ISBN 978-1-4571-8724-7.

LIPSON, Hod a Melba KURMAN. Fabricated: the new world of 3D printing ; [the promise and peril of a machine that can make (almost) anything]. Indianapolis: Wiley, 2013, xiv, 302 s., [8] obr.příl. : il., ; 22 cm. ISBN 978-1-118-35063-8.

FRANCE, Anna Kaziunas. Make: 3D printing. 1st ed. Sebastopol: Maker Media, 2013, xv, 213 s. : barev. il. ISBN 978-1-4571-8293-8.

CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, 2015, xxviii, 518 stran : ilustrace, fotografie. ISBN 978-981-4571-40-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

3D tlač sa v súčasnosti stáva čoraz dostupnejšou a využívanejšou či už medzi laickou verejnosťou alebo v priemysle. Svoje nezastupiteľné miesto má 3D tlač hlavne pri výrobe prototypov. Preto je dôležité poznať mechanické vlastnosti materiálov, ktoré sa bežne používajú.

Táto práca sa zaoberá zhrnutím doterajších znalostí o 3D tlači a mechanických vlastnostiach výtlačkov. Hlavným cieľom bolo na základe zistených mechanických vlastností nezávisle porovnať materiály pre 3D tlač od 5 rôznych výrobcov. Od všetkých boli vybrané vzorky materiálu PLA natural, z ktorého boli následne vyrobené skúšobné vzorky. Všetky vzorky boli podrobené ťahovej skúške a z nameraných dát boli určené intervaly hodnoty medze pevnosti a modulu pružnosti pre každého výrobcu.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Mechanické vlastnosti, FDM technológia, statická skúška ťahom, 3D tlač, PLA natural

## **ABSTRACT**

3D printing is being widely used by public and also in industry. The main advantage of 3D printing is rapid making prototypes. That is the reason why it is needed to know what the mechanical properties of the material that is being used are.

This thesis is about making research of knowledge about 3D printing and mechanical properties of printed parts. Main task was comparing materials used in 3D printers and find out which producer makes materials with the best tensile strength. 5 producers were selected to be compared in this test. From each producer was bought PLA filament in natural colour, this material was then used to print testing specimens. All specimens were tested on maximum tensile strength and Young's elastic modulus and then was calculated the confidence interval for each producer.

## **KEY WORDS**

Mechanical properties, FDM technology, tensile test, 3D print, PLA natural



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

NOVOSÁD, I. Mechanické vlastnosti PLA dílů realizovaných 3D tiskem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..





## **POĎAKOVANIE**

Týmto by som sa rád poďakoval pánovi doc. Ing. Davidovi Palouškovi, Ph.D. za odborné vedenie a prínosné rady. Ďalej Ing. Petrovi Vosynekovi, Ph.D. za ochotný prístup a pomoc pri materiálových skúškach, Ing. Ondřejovi Vaverkovi a Ing. Michalovi Bradovi za odborné rady a pripomienky. Tiež sa chcem poďakovať mojej rodine a známym za neochvejnú podporu a trpezlivosť.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Týmto prehlasujem, že som túto bakalársku prácu Mechanické vlastnosti PLA dielov realizovaných 3D tlačou vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D.. Prehlasujem, že všetky zdroje a informácie sú riadne citované podľa normy ISO 690 a sú uvedené v zozname použitej literatúry.

V Brne dňa.....

.....  
Ivan Novosad



---

<b>OBSAH</b>	
<b>1 ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>13</b>
2.1 Fused Deposition Modelling (FDM)	13
2.2 Materiály používané pri FDM 3D tlači	13
2.2.1 PLA	14
2.2.2 ABS	15
2.2.3 Porovnanie PLA a ABS	16
2.3 Vplyv procesných parametrov na výsledné mechanické vlastnosti	17
2.3.1 Vnútoraná výplň	17
2.3.2 Orientácia výtlačku	18
2.3.3 Výška vrstvy	19
2.3.4 Vplyv farby materiálu	21
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>22</b>
3.1 Ciele práce	22
<b>4 MATERIÁL A METÓDY</b>	<b>23</b>
4.1 Materiál	23
4.2 Použitá 3D tlačiareň a nastavenia tlače	23
4.3 Metodika testovania a vyhodnocovania	24
4.3.1 Definícia medze pevnosti $\sigma_m$	25
4.3.2 Definícia modulu pružnosti E	25
4.3.3 Ťahová skúška	26
<b>5 VÝSLEDKY</b>	<b>27</b>
5.1 Výsledky ťahovej skúšky	27
5.1.1 Medza pevnosti $\sigma_m$	27
5.1.2 Modul pružnosti E	28
<b>6 DISKUSIA</b>	<b>29</b>
<b>7 ZÁVER</b>	<b>34</b>
<b>8 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY</b>	<b>35</b>
<b>9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b>	<b>37</b>
<b>10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV</b>	<b>38</b>
<b>11 ZOZNAM TABULIEK</b>	<b>39</b>
<b>12 ZOZNAM PRÍLOH</b>	<b>40</b>
<b>PROTOKOL Z ŤAHOVEJ SKÚŠKY 2017</b>	<b>41</b>
<b>PROTOKOL Z ŤAHOVEJ SKÚŠKY 2018</b>	<b>42</b>

## 1 ÚVOD

3D tlač zažíva v poslednom čase nárast popularity medzi laickou ale aj odbornou verejnosťou. Má svoj nezastupiteľný význam hlavne pri tvorbe prototypov, súčiastok s ťažko vyrobiteľnými tvarmi ale aj v domácom prostredí, kde sa často využíva na výrobu náhradných dielov.

Pre laickú verejnosť je najznámejšou technológiou 3D tlače Fused Deposition Modelling (FDM). Táto metóda vznikla v 80. rokoch minulého storočia, výrazne sa však rozšírila až začiatkom nového milénia, pretože potrebná výpočtová technika sa stala cenovo dostupnou aj pre širšiu verejnosť. Ďalším dôvodom prečo FDM prerazilo tak neskoro, sú patenty, ktoré neumožňovali širšie použitie. [1] Kvôli týmto patentom si rôzne firmy patentovali iné názvy, napríklad FFF (Fused Filament Fabrication), FLM (Fused Layer Modelling/Manufacturing). Princíp tlače je rovnaký, ide iba o právnické opatrenie. Pretože je najpoužívanejšia, bude v tejto práci ďalej používaná iba skratka FDM.

Najpoužívanejšími materiálmi pri FDM tlači sú: ABS (Akrylonitrilbutadiénstyrén) a PLA (Polylactid Acid – Polymliečna kyselina). Sú to termoplasty, ktoré sa stávajú tvárnymi pri teplote cca 200 °C. Vďaka svojim dobrým mechanickým vlastnostiam sú v priemysle často používané na výrobu predprodukčných prototypov. Pre výrobu a testovanie mechanicky namáhaných prototypov je nesmierne dôležité poznať presné mechanické vlastnosti daného materiálu. Na internete je mnoho zdrojov kde sa dajú nájsť všeobecné mechanické vlastnosti daného materiálu, ale ako ukazuje táto práca, materiál od každého výrobcu dosiahol inú medzu pevnosti, iný modul pružnosti a inú smerodajnú odchýlku. Preto je potrebné si pred výrobou testovacieho modelu overiť reálne mechanické vlastnosti konkrétneho materiálu.

## 2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2

3D tlač sa radí medzi aditívne technológie výroby. To znamená, že výrobok vzniká pridávaním materiálu. Je to proces opačný k trieskovému obrábaniu kde sa materiál ubera z polotovaru a tým je dosahovaný požadovaný tvar, napr. sústruženie, frézovanie alebo vŕtanie. Pojem 3D tlač v sebe zahŕňa veľké množstvo rozličných princípov pracujúcich s rôznymi materiálmi (plast, kov, sklo...). V tejto práci sa budeme zaoberať iba technológiou FDM.

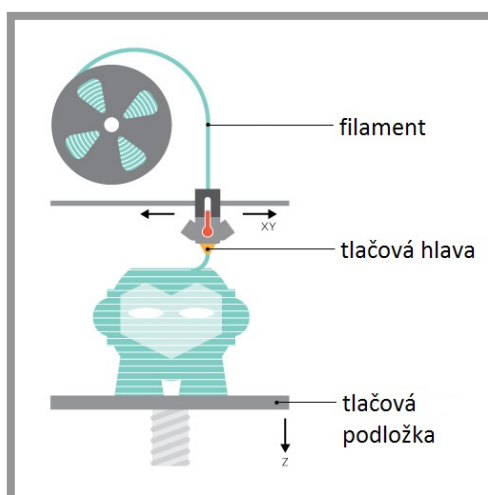
### 2.1 Fused Deposition Modelling (FDM)

2.1

Jedná sa o najrozšírenejšiu technológiu 3D tlače z niekoľkých dôvodov. Je cenovo dostupná, tlačiareň sa dá vyrobiť a poskladať aj v domácom prostredí a takisto existuje veľa diskusných fór a web stránok kde sa dá nájsť pomoc pri problémoch s tlačiarňou.[2]

Vstupným polotovarom pri FDM 3D tlači je takzvaný filament, čo je plastový drôt o presne danom priemere namotaný na kotúči. V dnešnej dobe existuje široká ponuka materiálov do 3D tlačiarní, najpoužívanejšími sú však PLA a ABS. Najčastejšie sa používa filament s priemerom 1,75 mm, pre veľkorozmerové tlačiarne sú k dispozícii filamenty s 3 mm priemerom. Princíp spočíva v tom, že sa filament privádza do tlačovej hlavy, ktorá je zohriata na tlačovú teplotu. Každý materiál a výrobca má iné rozpätie tlačových teplôt. Orientačne sa tieto teploty pohybujú od 200 do 260 °C (záleží na type materiálu).[3]

Roztavený materiál je následne vytláčaný cez trysku, ktorej priemer je obvykle v desatinách milimetrov. Čím menší je priemer trysky, tým jemnejšie detaily sa dajú dosiahnuť. Na druhej strane sa tým zas predlžuje čas tlače. Potom ako roztavený materiál opustí trysku je nanášaný na tlačovú podložku do požadovaného tvaru. Keď je celá vrstva dokončená, tak sa tlačová hlava posunie na ďalšiu vrstvu a celý proces sa opakuje vrstvu po vrstve.



Obr. 1 Princíp FDM 3D tlače [30]

### 2.2 Materiály používané pri FDM 3D tlači

2.2

V súčasnosti sú najpoužívanejšími materiálmi do FDM 3D tlačiarní ABS a PLA.[4, 5] Tieto materiály sú termoplasty, čo znamená, že so zvyšujúcou teplotou sa stávajú tvárnejšími a po vychladnutí si držia tvar.

Pri termoplastoch je dôležitým fyzikálnym údajom teplota skleného prechodu  $T_g$ . Táto teplota charakterizuje prechodový stav medzi sklovitým stavom a kvapalným, tzv. kaučukovitým. Pod teplotou skleného prechodu sa nachádza materiál v sklovitom stave, to znamená, že je tvrdý, krehký a má vysoký modul pružnosti. V prechodovej oblasti, tj. okolo teploty  $T_g$ , sa mechanické vlastnosti polyméru skokovo menia. Dochádza k výraznému poklesu modulu pružnosti a materiál sa stáva tvárnym.

Vzhľadom k týmto špecifikám polymérov je nutné poznať  $T_g$ , pretože táto teplota je považovaná za hranicu použiteľnosti mechanicky namáhaného polyméru. Po prekročení  $T_g$  dochádza k samovoľnej deformácii a strate funkčnosti.[6]

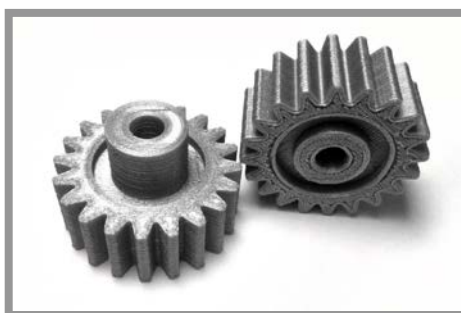
### 2.2.1 PLA

PLA (Polylactid Acid – Polymliečna kyselina) - chem. vzorec  $(C_3H_4O_2)_n$ , je na rozdiel od ostatných materiálov používaných v 3D tlači bioplast. Je vyrábané zo škrobu (kukuričného, z cukrovej trstiny alebo zo zemiakov), čo znamená, že sa vo vhodnom prostredí dokáže biologicky rozložiť. Napríklad plastová fľaša vyrobená z PLA by sa v oceáne rozložila za 6 až 24 mesiacov, zatiaľ čo fľaša vyrobená z konvenčného plastu by potrebovala na rozklad stovky až tisíce rokov.[5] PLA je najvyrábanejším bioplastom čo sa týka vyrobeného množstva. Keďže PLA nie je na rozdiel od ABS toxické, často sa používa na výrobu obalov na jedlo, jednorazových pohárov alebo v medicíne ako implantáty, ktoré sa po čase rozložia.

Tab. 1 Prehľad Mechanických a fyzikálnych vlastností PLA (merané pri teplote 23°C) [5, 7–11]

<i>Fyzikálna veličina</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Merané podľa</i>
<b>Hustota <math>\rho</math></b>	1.24–1.26 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
<b>Tepelná rozťažnosť</b>	68 $\mu\text{m/m-K}$	ASTM E831
<b>Medza pevnosti <math>\sigma_m</math></b>	48–71 MPa	ISO 527-2 / ASTM D638
<b>Modul pružnosti v ťahu E</b>	0.3–5.6 GPa	ISO 527-2 / ASTM D638
<b>Teplota skleného prechodu <math>T_g</math></b>	56–60 °C	ASTM E1356
<b>Teplota tavenia <math>T_t</math></b>	157–170 °C	
<b>Tlačová teplota</b>	180–230 °C	

Čo sa týka použitia PLA v 3D tlači, hlavnou výhodou PLA je, že má malý koeficient zmršťovania a preto je vhodné aj na výrobu veľkých dielov. PLA je považované za materiál, s ktorým sa pracuje veľmi jednoducho a je vhodný pre začiatočníkov. PLA má relatívne nízku tlačovú teplotu, na rozdiel od ABS pri tlačené nezapácha.[12] Vďaka svojej relatívne vysokej pevnosti je vhodné aj na výrobu mechanicky namáhaných prototypov.[13]



Obr. 2 Využitie PLA pri výrobe prototypov[15]

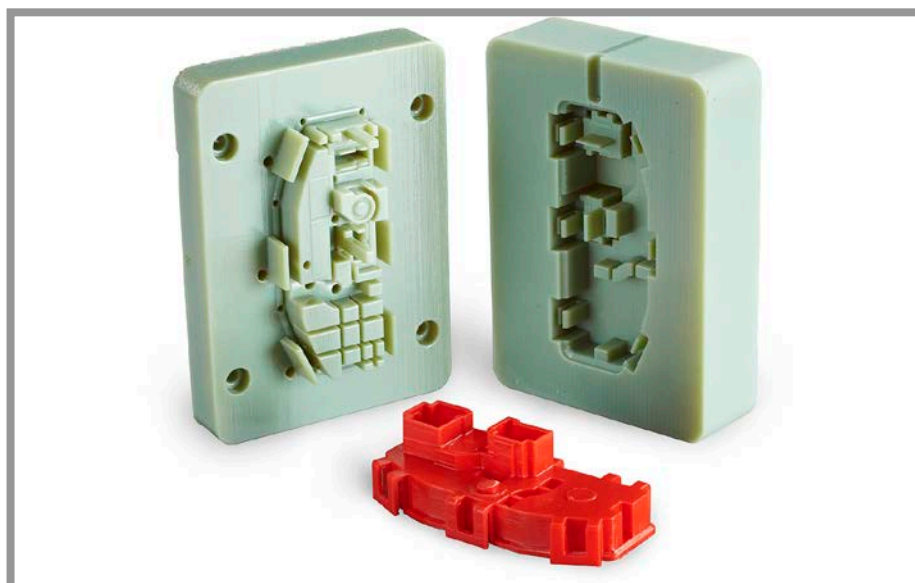
**2.2.2 ABS**

ABS (Akrylonitrilbutadiénstyrén) - chem. vzorec  $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$ , je amorfný polymér, s približným pomerom zložiek 1 diel akrylonitrilu, 1 diel butadiénu a 3 diely styrénu.[14] ABS sa dá dobre recyklovať a je odolné voči pôsobeniu väčšine chemikálií. Keďže je ABS amorfné (nemá kryštalovú štruktúru) nedá sa jednoznačne určiť bod tavenia.

Tab. 2 Prehľad mechanických a fyzikálnych vlastností ABS (merané pri teplote 23°C) [3, 11, 15, 16]

<i>Fyzikálna veličina</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Merané podľa</i>
<b>Hustota <math>\rho</math></b>	1.04–1.11 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
<b>Tepelná rozťažnosť</b>	81–95 $\mu\text{m/m-K}$	ASTM E831
<b>Medza pevnosti <math>\sigma_m</math></b>	28–46 MPa	ISO 527-2
<b>Modul pružnosti v ťahu E</b>	1.7–2.8 GPa	ISO 527-2
<b>Teplota skleného prechodu <math>T_g</math></b>	100–105 °C	ASTM E1356
<b>Tlačová teplota</b>	210–250 °C	

Tento plast sa používa v priemysle vo veľkom množstve, hlavne pri plastových dieloch vyrábaných vstrekománím roztaveného plastu do formy (automobilový priemysel, náradie, lego...).[16]



Obr. 3 Forma na vstrekovanie plastov[19]

V oblasti 3D tlače je vhodný skôr pre malé objekty, pretože pri väčších dieloch hrozí zničenie dielu kvôli zmršťovaniu sa materiálu. Tomuto problému sa dá vyhnúť použitím zakrytovaných tlačiarňí, ideálne aj s vyhrievanou tlačovou komorou.[17] Ďalšou nevýhodou je, že pri tlačením sa z materiálu uvoľňujú dráždivé výpary, preto je dôležité používať ABS v dobre vetraných priestoroch. Zaujímavou vlastnosťou ABS je jeho reakcia s acetónom. Pri pôsobení acetónu na ABS dochádza k jeho rozpúšťaniu, čo sa dá využiť na vyhladzovanie povrchu výtlačku.



Obr. 4 Vyhľadzovanie ABS pomocou acetónu[7]

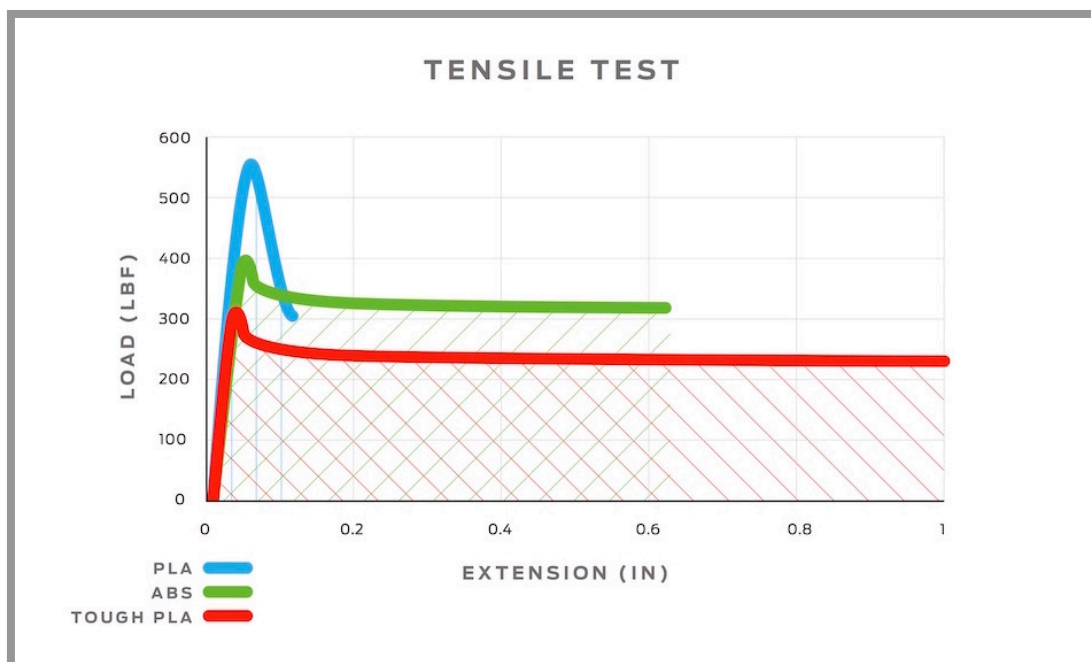
### 2.2.3 Porovnanie PLA a ABS

Každý materiál má svoje výhody aj nevýhody, preto je potrebné poznať pole pôsobnosti každého materiálu a vedieť vybrať vhodný materiál podľa spôsobu použitia výtlačku. Cenovo sú tieto materiály porovnateľné, ich ceny sa pohybujú okolo 600 Kč/kg.[3]

PLA je materiál vhodný na tzv. kancelársku tlač, pretože na rozdiel od ABS pri tlačení nezapácha. PLA je hodnotené ako materiál, s ktorým sa dobre pracuje a je vhodné pre začiatočníkov. PLA má citelne nižšiu teplotu skleneného prechodu, takže nie je vhodné pre aplikácie za zvýšenej teploty. [11]

Pri použití ABS môže dôjsť k deformáciám väčších dielov vplyvom vnútorného napätia, PLA je na tento problém oveľa menej náchylné. Na rozdiel od ABS, pri PLA nie je možné upravovať výsledný povrch pomocou acetónu alebo inej chemikálie.

Pri porovnaní ťahových diagramov je zrejmé, že bežné PLA dosahuje vyššie hodnoty medze pevnosti, avšak nie je schopné takej veľkej deformácie ako ABS.



Obr. 5 Ťahové diagramy PLA a ABS[21]



## 2.3 Vplyv procesných parametrov na výsledné mechanické vlastnosti

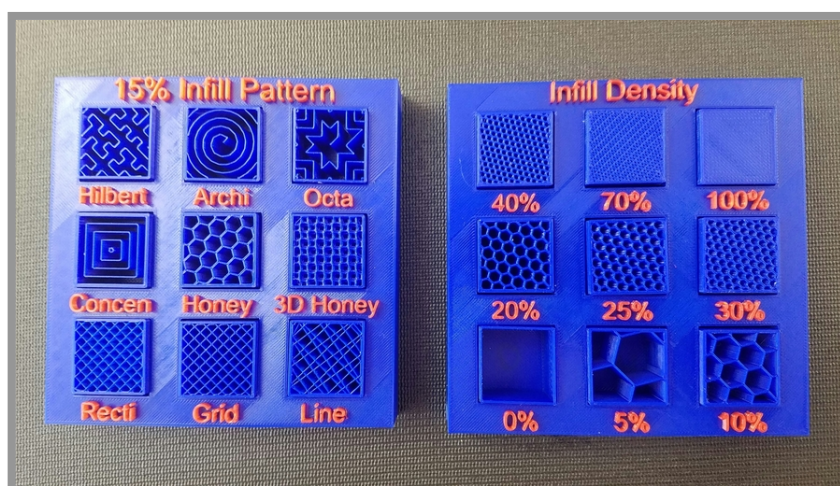
2.3

Kvalitu výtlačku ovplyvňuje množstvo faktorov: kvalita materiálu, možnosti samotnej 3D tlačiarne (napr. intenzita chladenia alebo zle nastavené vôle) a v neposlednom rade sú to parametre tlače. Medzi dôležité parametre tlače patrí napríklad: vnútorná výplň (hustota a tvar), orientácia výtlačku, výška vrstvy, teplota trysky, teplota podložky, rýchlosti posuvov a mnoho ďalších. Programy, ktoré pripravujú modely na 3D tlač, majú tieto nastavenia väčšinou prednastavené od výrobcu. Mnoho užívateľov však tieto nastavenia upravuje podľa vlastných skúseností.

### 2.3.1 Vnútorná výplň

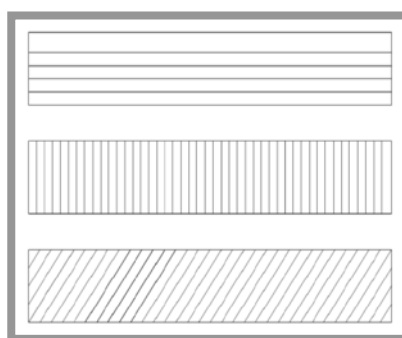
2.3.1

Výtlačky na 3D tlačiarňi sa väčšinou nerobia plné, ale čiastočne duté. Je to hlavne kvôli úspore materiálu a času. Väčšinou býva prednastavená 20% hustota vnútornej výplne. Takisto sa dá meniť tvar vnútornej výplne. Väčšinou býva prednastavené šrafovanie pod uhlom  $45^\circ$  (rectilinear), významne je používaná aj výplň takzvaným Honeycomb. Je to výplň šesť uholníkmi, ktoré vyzerajú ako včelí plát vosku. Vzorov výplne je veľké množstvo a každý používateľ si môže vybrať podľa vlastných skúseností, podľa tvaru a účelu výtlačku.



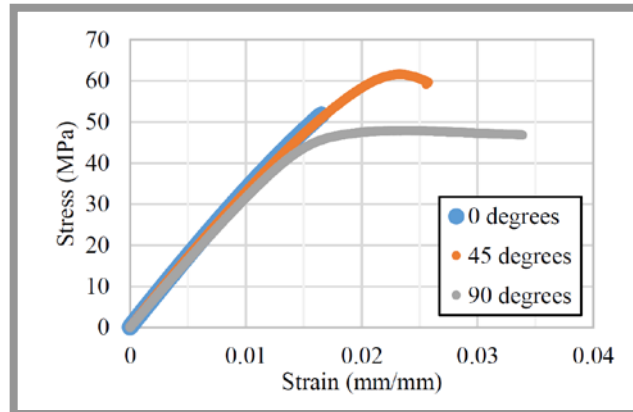
Obr. 6 Rozdiel medzi vzorom výplne a hustotou výplne[22]

Letcher[10] sa zamerl na porovnávanie výplne rovnobežnými čiarami pod rôznymi uhlami. Zamerl sa na výplň pod  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $45^\circ$  (vzhľadom k zaťažovacej sile).



Obr. 7 Orientácia výplne:  $0^\circ$ (hore),  $90^\circ$ (stred) a  $45^\circ$ (dole)[11]

Výsledky ťahových skúšok jednoznačne ukazujú, že výplň pod uhlom 45° dosahuje najvyššiu pevnosť v ťahu.



Obr. 8 Výsledky ťahovej skúšky pre rôzne orientácie výplne[11]

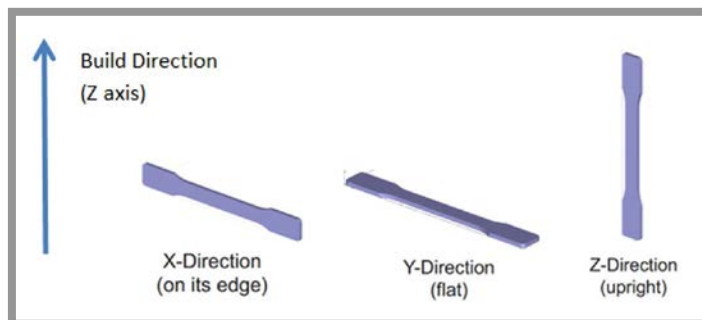
Fernandez-Vincente et al.[18] porovnával vzory rectilinear, honeycomb a line (nerovnoběžné čiary). Z jeho výsledkov vyplýva, že pri 100% výplni je rozdiel výslednej medze pevnosti medzi jednotlivými druhmi výplne takmer zanedbateľný.

<i>Infill pattern</i>	<i>Infill density</i>	<i>Tensile strength (MPa)</i>
Line	20	16.00
Line	50	20.06
Line	100	35.68
Rectilinear	20	15.62
Rectilinear	50	19.58
Rectilinear	100	36.40
Honeycomb	20	16.52
Honeycomb	50	21.78
Honeycomb	100	36.10
Raw ABS	—	36.56

Obr. 9 Vplyv vzoru výplne na výslednú medzu pevnosti[18]

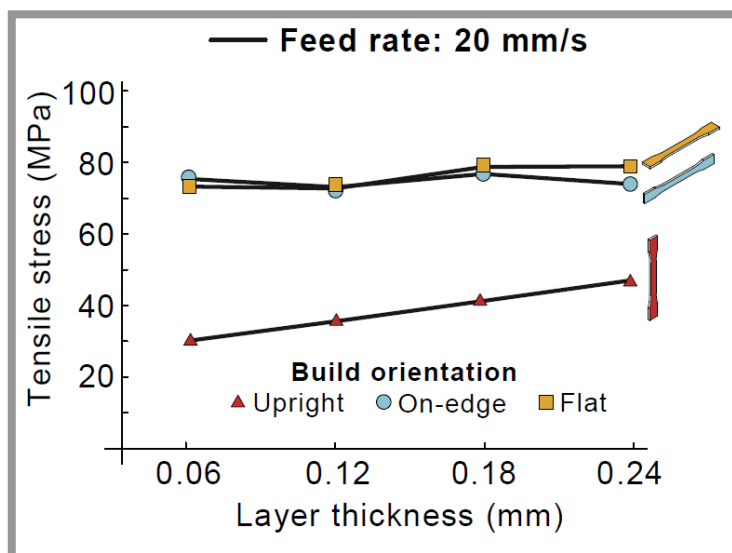
### 2.3.2 Orientácia výtlačku

Orientácia výtlačku ovplyvňuje výslednú medzu pevnosti ešte viac ako tvar vnútornej výplne. Pri tvorbe skúšobnej vzorky na 3D tlačiarňi existuje viacero spôsobov ako vzorku umiestniť na tlačovú podložku. Základné pozície výtlačku sú: na hranu, na plochu alebo na výšku. Teoreticky je možné natáčať vzorku pod rôznymi uhlami, ale je to zbytočná komplikácia s neistým výsledkom.



Obr. 10 Orientácia výtlačku[24]

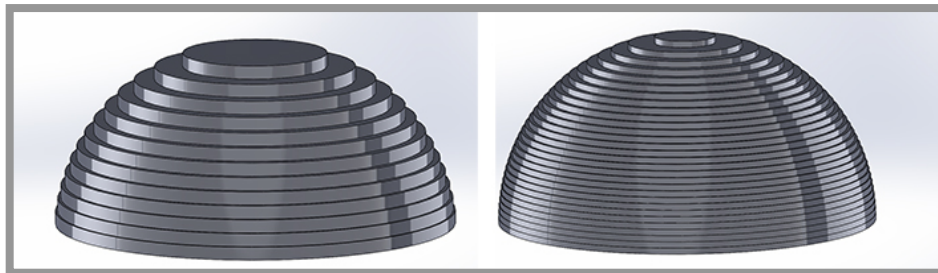
Touto problematikou sa zaoberal Chacón et al.[8], ktorý zistil že medzi orientáciou na hranu a na plochu sú rozdiely minimálne. Výrazný rozdiel však nastáva pri orientácii na výšku, kde je dosahovaná pevnosť menšia o 50 až 70 % nižšia. Je to spôsobené tým, že pri orientácii na výšku nedochádza primárne k namáhaniu materiálu ako takého, ale rozhodujúcu rolu hrá súdržnosť medzi vrstvami.



Obr. 11 Medza pevnosti v závislosti na orientácii výtlačku a na výške vrstvy[9]

### 2.3.3 Výška vrstvy

Výška vrstvy je ďalší parameter, ktorý významne ovplyvňuje kvalitu výtlačku a hlavne štruktúru povrchu. Každý model sa pred tlačou musí previesť na dáta, ktoré dokáže 3D tlačiareň spracovať. To mimo iného znamená, že sa daný model rozloží do veľkého počtu rovnobežných rovín, čím vzniknú jednotlivé vrstvy výtlačku. Vzdialenosť medzi týmito rovinami sa nazýva výška vrstvy. Výška vrstvy sa bežne pohybuje od 50  $\mu\text{m}$  do 300  $\mu\text{m}$ . Pre dosiahnutie jemnejšieho povrchu výtlačku treba zvoliť čo najmenšiu výšku vrstvy, treba však rátať s tým, že sa predĺži čas tlače. Na bežné výtlačky je najčastejšie používaná výška vrstvy 200  $\mu\text{m}$ , často je to aj výrobcom prednastavená hodnota.



Obr. 12 Rozdielne výšky vrstvy[25]

Výška vrstvy však nemá iba estetický vplyv na výsledný výtlačok. Ako ukazuje Tymrak et al.[19] tak pri ABS aj pri PLA je najvyššia medza pevnosti dosahovaná pri výške vrstvy 200  $\mu\text{m}$ .

	Average tensile strength (MPa)	Average elastic modulus (MPa)
<b>ABS</b>		
0.4 mm Layer height	28.2	1875
0.3 mm Layer height	27.6	1736
0.2 mm Layer height	29.7	1839
<b>PLA</b>		
0.4 mm Layer height	54.9	3286
0.3 mm Layer height	48.5	3340
0.2 mm Layer height	60.4	3480

Obr. 13 Dosahované medze pevnosti na základe výšky vrstvy[19]

Habeeb et al.[20] takisto prišiel k záveru, že najvyššia pevnosť je dosahovaná pri výške vrstvy 200  $\mu\text{m}$ .

Layer height (mm)	Average tensile strength (MPa)	Average elastic modulus (MPa)
0.1	35.90	1005
0.2	45.56	1125
0.3	45.04	1090
0.4	32.01	725

Obr. 14 Vplyv výšky vrstvy na výslednú medzu pevnosti[27]

Tento jav je zdôvodnený tým, že pri narastajúcej výške vrstvy dochádza k zvýšeniu pórovitosti materiálu. Pri výške vrstvy 0.1 mm však došlo k opačnému javu a nameraná medza pevnosti bola nižšia ako pri výške vrstvy 0.2 mm aj keď je pórovitosť menšia. Pokles medze pevnosti pri výške vrstvy 0.1 mm je zdôvodnený tým, že mohlo dochádzať k poškodzovaniu predošlej vrstvy materiálu pri nanášaní novej vrstvy materiálu kvôli malej vzdialenosti medzi vrstvami.[20]

### 2.3.4 Vplyv farby materiálu

Výrobcovia sa v dnešnej dobe pokúšajú zaujať zákazníkov rôznymi spôsobmi, jedným z nich je čo najväčšia ponuka farebných variánt materiálov. Bežne výrobcovia ponúkajú z jedného druhu materiálu desiatky farebných variánt. V prípade požiadavky na atypickú farbu sú niektorí výrobcovia ochotní vyrobiť materiál s danou farbou na zákazku.



Obr. 15 Rôzne farby filamentov[14]

Ako ukázal Wittbrodt et al.[21] farba materiálu má nezanedbateľný vplyv na pevnosť materiálu. Najlepšie z testu vyšla farebná varianta natural, v ktorej nie sú pridané žiadne pigmenty a je to prirodzená farba PLA. Naopak, najhoršie dopadla šedá farba, ktorá dosiahla až o 10 % menšiu pevnosť.

Color	Ultimate tensile strength (MPa)
Natural	57.16 ± 0.35
Black	52.81 ± 1.18
Gray	50.84 ± 0.23
Blue	54.11 ± 0.30
White	53.97 ± 0.26

Obr. 16 Medza pevnosti v závislosti na farbe materiálu[28]

Tieto rozdiely môžu byť spôsobené tým, že pridané farbivá bránia plynulému tečeniu materiálu a vznikajú tak nechcené póry. Tieto výsledky sa však nedajú generalizovať na všetky materiály rovnakej farby, pretože každý výrobca môže používať iné farbiace aditíva. Chemické zloženie prídavných farbív totiž výrobcovia neudávajú, je to ich výrobné tajomstvo.[21]

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

Na dnešnom trhu existujú desiatky výrobcov filamentov do FDM 3D tlačiarní, avšak neexistuje jednotný faktor, podľa ktorého by sa dali produkty jednotlivých výrobcov nezávisle porovnávať. Dobrým porovnávacím faktorom by mohla byť napríklad medza pevnosti jednotlivých materiálov. Problémom je, že ju neudávajú všetci výrobcovia, respektíve materiály nie sú testované podľa rovnakej normy. Keďže pri niektorých materiáloch je udávaná pevnosť podľa americkej normy ASTM D882 a niektoré materiály sú testované podľa európskej normy ISO 527-2, nie je možné relevantne porovnávať tieto údaje. Hodnoty namerané podľa americkej normy sú často dvojnásobne vyššie oproti porovnateľnému materiálu skúšaného podľa európskej normy.[22, 23] Problémom je, že norma ASTM D882 je určená na testovanie tenkých fólií, kdežto pri ISO 527-2 sú testovacie telesá hrubé 4 mm. Takisto je výrazne odlišná aj zaťažovacia rýchlosť a ostatné testovacie podmienky.

Cieľom tejto práce je navrhnuť experiment a nezávisle porovnať vzorky PLA materiálu od 5 výrobcov filamentu, ktorí sú etablovaní na českom trhu. Výber výrobcov bol navrhnutý tak, aby pokryl škálu od lacnejších výrobcov až po prémiových. Ceny týchto materiálov sa pohybujú od 540 Kč/kg až po 900 Kč/kg.[24]

PLA bolo zvolené na testovanie preto, lebo sa nedeformuje pri stavbe väčších dielov (skúšobné vzorky sú dlhé 170mm) a je užívateľsky jednoduchšie na tlač. Aby sa zamedzilo vplyvu farbív na výslednú pevnosť, bola vybraná farebná varianta Natural. To znamená, že v materiáli nie sú pridané žiadne farbivá. Tento typ materiálu ponúkajú všetci výrobcovia, takže sa dajú výsledky objektívne porovnať.

#### 3.1 Ciele práce

Cieľom bakalárskej práce je analýza mechanických vlastností PLA materiálu spracovávaného technológiou FDM 3D tlače.

Dielčie ciele bakalárskej práce:

- Definícia parametrov pre výrobu vzoriek
- Návrh experimentu pre zistenie mechanických vlastností
- Experimenty a zber dát
- Vyhodnotenie a stanovenie záveru



## 4 MATERIÁL A METÓDY

Za účelom porovnania medze pevností materiálov jednotlivých výrobcov bola vyrobená séria 5 skúšobných telies od každého výrobcu, ktoré sa následne podrobili ťahovej skúške. Všetky skúšobné vzorky boli tlačené pri rovnakých nastaveniach a boli testované za rovnakých podmienok.

### 4.1 Materiál

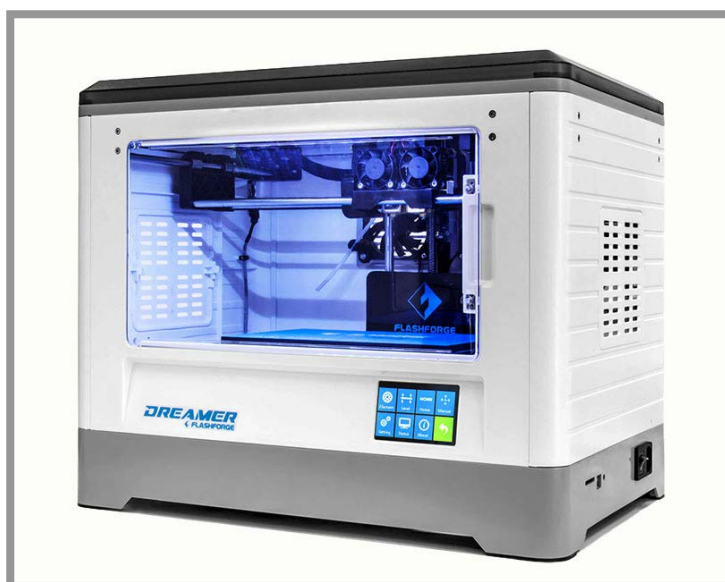
4.1

Pre testovanie bol vybraný materiál PLA natural (bez pridaných farbív), aby sa zamedzilo vplyvu rôznych pigmentov na výslednú pevnosť.[21] Do experimentu boli vybraní 5 rôzni svetoví výrobcovia filamentu. Bola snaha obsiahnuť celú škálu výrobcov, t.j. od tých najlacnejších až po prémiové značky. Boli testované vzorky od výrobcov: Plasty Mladeč, Devil Design, Verbatim, Eco3D a Fillamentum.

### 4.2 Použitá 3D tlačiareň a nastavenia tlače

4.2

Na výrobu vzoriek bola použitá profesionálna 3D tlačiareň Flashforge Dreamer. Stavebný priestor tejto tlačiarne je 230 x 150 x 140 mm.[25] Vďaka relatívne veľkej tlačovej podložke bolo možné vytlačiť všetkých 5 vzoriek naraz.



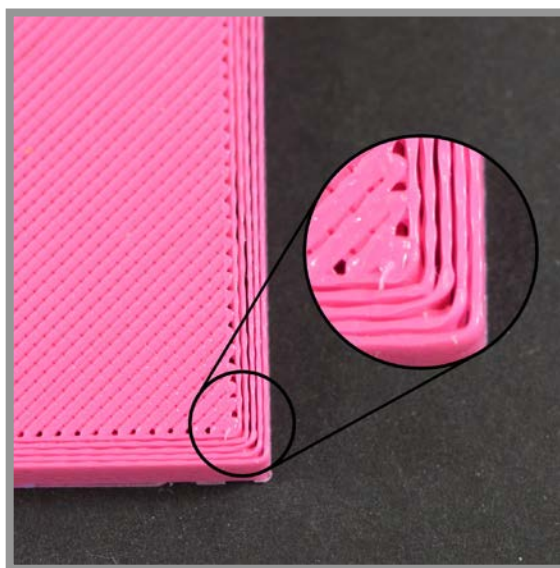
Obr. 17 3D tlačiareň Flashforge Dreamer[32]

Nastavenia tlače boli pre všetky vzorky rovnaké (teplota trysky a podložky, výška vrstvy, rýchlosť posuvu...) Teplota trysky bola zvolená 205 °C, tak aby ležala v intervale výrobcom udávaných teplôt každého materiálu. Teplota podložky bola nastavená na 70 °C (vyhrievaná podložka zlepšuje príľnavosť prvej vrstvy). Výška prvej vrstvy bola 270 μm, výška ostatných vrstiev bola 180 μm (nastavenia odporúčané výrobcom tlačiarne). Takisto rýchlosť posuvov zostala v továrenských nastaveniach tlačiarne, a to 60 mm/s. Všetky výtlačky boli orientované na plochu, t.j. položené najväčšou plochou na podložke. Táto orientácia je najjednoduchšia na tlačenie a ako bolo uvedené v kapitole 2.3.2, dosahuje táto orientácia dobré hodnoty medze pevnosti.

Tab. 3 Použité nastavenia tlače

<i>Parameter</i>	<i>Hodnota</i>
<b>Teplota trysky</b>	205 °C
<b>Teplota podložky</b>	70 °C
<b>Výška vrstvy</b>	Prvá vrstva 270 μm, ostatné 180 μm
<b>Rýchlosť posuvov</b>	60 mm/s
<b>Extrusion ratio</b>	109 %
<b>Počet obvodových čiar (shell)</b>	2
<b>Vnútna výplň (infill)</b>	100 %
<b>Vzor výplne (pattern)</b>	Šrafovanie pod 45° uhlom (Rectilinear)
<b>Priemer trysky</b>	0,4 mm
<b>Chladiaci ventilátor</b>	Zapnutý

Pojem uvedený v Tab. 3 ako Extrusion ratio je korekčné nastavenie, ktorým sa dá zvýšiť alebo znížiť objem vytlačaného materiálu. Vo východných nastaveniach je nastavený na 100 %, to znamená, že je vytlačaný taký objem ako vypočítal software. Niekedy však treba tento objem korigovať, či už smerom uberania alebo pridávania materiálu. Tento pomer bol empiricky otestovaný a nastavený, pretože pri prvých pokusných výtláčoch bol evidentný nedostatok materiálu. Tento problém je ilustrovaný na Obr. 18.[26]



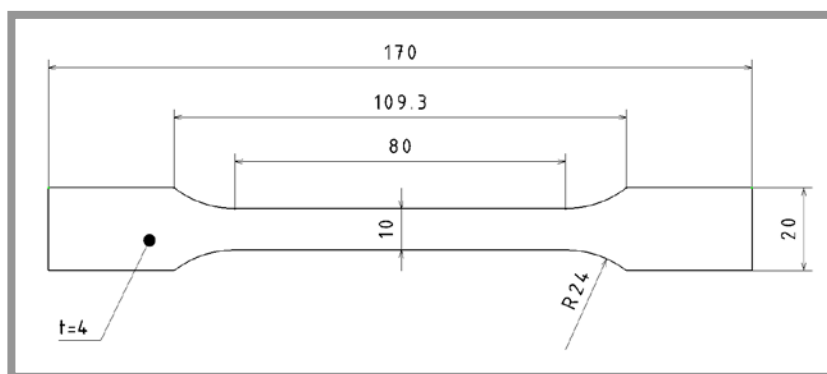
Obr. 18 Nedostatočný objem vytlačaného materiálu[26]

### 4.3 Metodika testovania a vyhodnocovania

Pre tento experiment bola zvolená norma ISO 527-2, je to norma pre stanovovanie mechanických vlastností pre tvárnené a vytlačované plasty.

Aby bolo možné spoľahlivo vyhodnotiť výsledky ťahovej skúšky, je normou stanovený minimálny počet 5 skúšobných telies. Tvar a rozmery skúšobného telesa sú stanovené normou ISO 294-1.[27]





Obr. 19 Skúšobné teleso 1A podľa normy ISO 294-1[33]

Norma ďalej určuje, že z výsledkov bude stanovený interval spoľahlivosti s 95% pravdepodobnosťou podľa normy ISO 2602. Bolo uvažované normálne (Gaussovo) rozdelenie, ktorého parametre, priemer  $m$  a smerodajná odchýlka  $s$  sú neznáme. Rozdelenie výsledkov získaných pri skúšobných podmienkach je všeobecne brané ako normálne rozdelenie alebo blízke normálnemu rozdeleniu. Výsledkom tohto štatistického spracovania sú intervaly medze pevnosti a modulu pružnosti pre každého výrobcu

#### 4.3.1 Definícia medze pevnosti $\sigma_m$

$\sigma_m$  je napätie pri prvom lokálnom maxime pozorovaného v priebehu ťahovej skúšky. Je to hranica maximálnej pevnosti daného materiálu. Po prekročení tejto hodnoty dochádza ku vzniku krčku a pri pokračujúcom zaťažovaní dochádza k lomu.[27]

$$\sigma_m = F_m / A \quad (1)$$

kde platí

$\sigma_m$  je hodnota medze pevnosti, vyjadrená v megapascaloch [MPa]

$F_m$  je maximálna nameraná sila, vyjadrená v newtonoch [N]

$A$  je počiatočný prierez skúšobného telesa, vyjadrený v milimetroch štvorcových [mm<sup>2</sup>]

#### 4.3.2 Definícia modulu pružnosti $E$

Tento modul pružnosti je často označovaný aj ako Youngov modul. Je to materiálová konštanta, ktorá charakterizuje správanie materiálu zaťaženého ťahovým napätím. Čím väčší je modul pružnosti, tým väčšie napätie je potrebné na dosiahnutie rovnakej deformácie. Modul pružnosti je priamo definovaný Hookovým zákonom ako pomer ťahového napätia a pomerného predĺženia. Hookov zákon platí iba v oblasti elastickej (vratnej) deformácie.[27]

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (2)$$

$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (3)$$

kde platí

$E$  je Youngov modul pružnosti, vyjadrený v megapascaloch [MPa]

$\sigma$  je hodnota príslušného napätia, vyjadrená v megapascaloch [MPa]

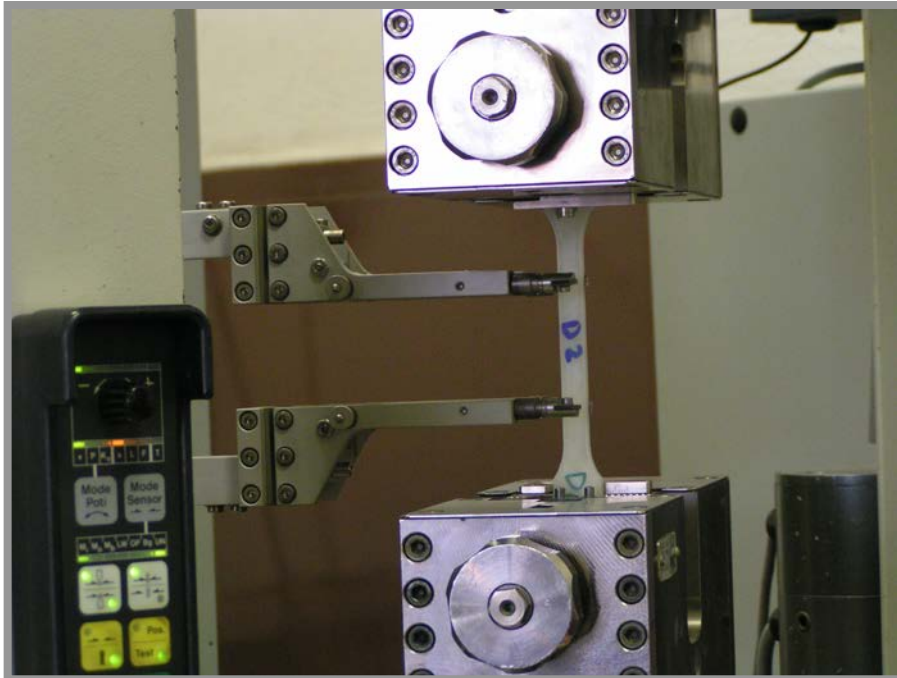
$\varepsilon$  je pomerné predĺženie, bezrozmerné číslo [-]

$\Delta l$  je zmena dĺžky pri zaťažení, vyjadrená v milimetroch [mm]

$l$  je pôvodná dĺžka, vyjadrená v milimetroch [mm]

### 4.3.3 Ťahová skúška

Meranie prebehlo na stroji Zwick Z020, ktorý spĺňa všetky požiadavky normy ISO 527-2. Maximálna ťahová sila, ktorú tento stroj dokáže vyvinúť, je 20 kN.



Obr. 20 Ťahová skúška

Počas skúšky bolo zaznamenávané predĺženie skúšobných telies v závislosti na zaťažujúcej sile. Z týchto záznamov boli následne zostrojené ťahové krivky pre názornejšie porovnanie priebehu ťahovej skúšky (viď kapitola 6). Výstupnými dátami z ťahovej skúšky bol protokol, kde bola zaznamenaná maximálna zaťažujúca sila, medza pevnosti a modul pružnosti pre každé skúšobné teleso (viď prílohy 1 a 2).

## 5 VÝSLEDKY

5

### 5.1 Výsledky ťahovej skúšky

5.1

Celkovo bolo otestovaných a vyhodnotených 25 skúšobných telies. Na základe získaných dát bola následne vyhodnocovaná medza pevnosti a modul pružnosti každého skúšobného telesa. Z týchto dát boli následne stanovené intervaly medze pevnosti a modulu pružnosti pre každého výrobcu.

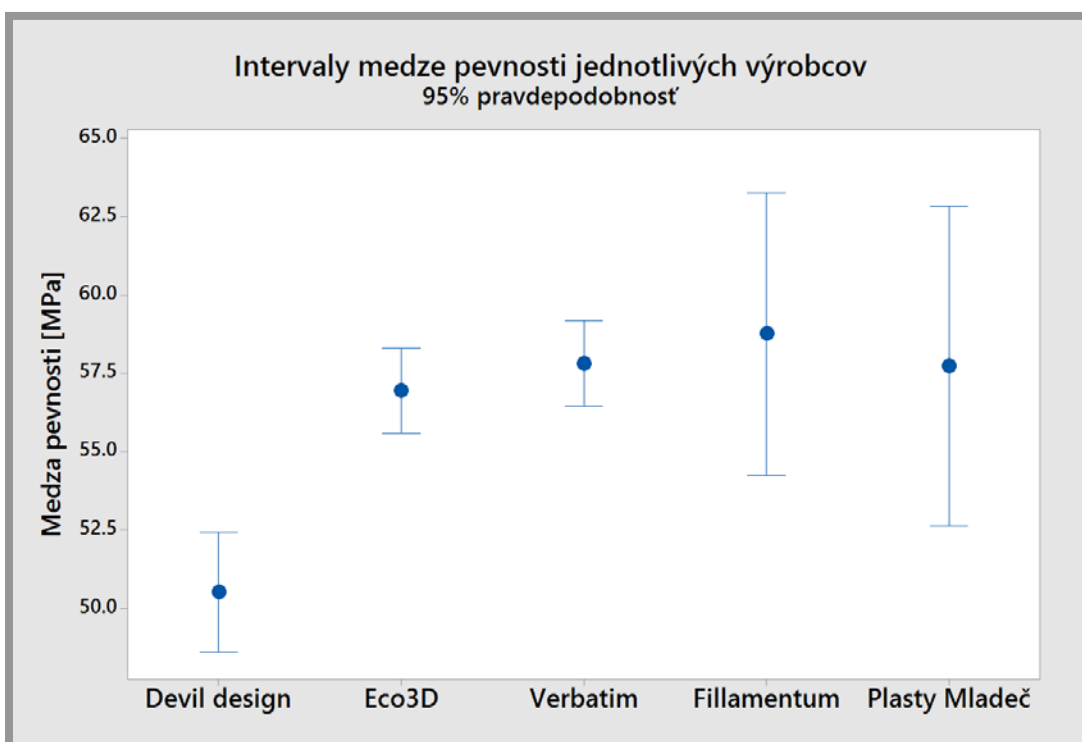


Obr. 21 Skúšobné telesá po ukončení testov

#### 5.1.1 Medza pevnosti $\sigma_m$

5.1.1

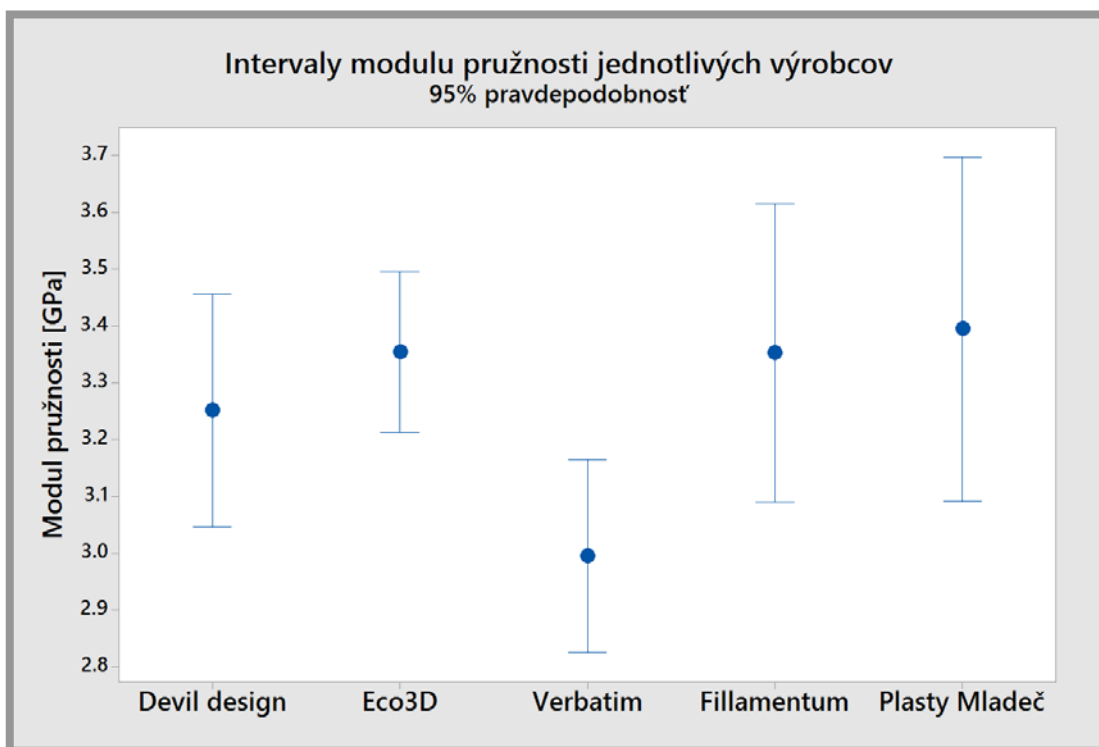
Spracovávanie dát prebiehalo v programe Minitab 17. Výstupnými dátami z tohto programu boli stanovené intervaly medze pevnosti s 95% pravdepodobnosťou. Pre názornejšie porovnanie boli výsledky vynesené do grafu (Obr. 22).



Obr. 22 Grafické znázornenie intervalu medze pevnosti

### 5.1.2 Modul pružnosti E

Bol vyhodnocovaný v lineárnej oblasti zaťažovania 0 – 500 N. Tento úsek odpovedá pružnej deformácii a vyjadruje závislosť napätia na deformácii podľa Hookovho zákona. Modul pružnosti odpovedá smernici priesečnice, ktorou bola preložená ťahová krivka každého skúšobného telesa. Získané intervaly modulu pružnosti boli vynesené do grafu (Obr. 23).



Obr. 23 Grafické znázornenie intervalov modulu pružnosti

## 6 DISKUSIA

V tejto práci bola overená hypotéza, že mechanické vlastnosti rovnakého materiálu od rôznych výrobcov nemusia dosahovať rovnaké mechanické vlastnosti. Na zistenie prípadných rozdielov bol zvolený výber výrobcov tak, aby pokrýval škálu od najlacnejších až po tie najdrahšie materiály bežne dostupné v Českej republike. Dosiahnuté výsledky korešpondujú s predpokladom, že medza pevnosti sa bude pohybovať v rozmedzí 50 – 70 MPa a modul pružnosti bude v rozmedzí 3 – 4 GPa.[8, 10] Taktiež sa potvrdil predpoklad, že pevnosti udávané výrobcami, ktoré boli merané podľa normy ASTM D882, nepodávajú relevantnú informáciu o reálnej pevnosti materiálu. Norma ASTM D882 je totiž určená na skúšanie mechanických vlastností tenkých fólií, čo nezodpovedá bežnému používaniu výtlačkov na 3D tlačiarňi. Počas merania boli pozorované rôzne trendy. Pri vzorkách, ktoré boli vyrobené z rovnakej šarže boli ťahové krivky až na jemné odchýlky takmer identické. Pri sadách vzoriek, ktoré neboli vyrobené z rovnakej šarže materiálu, sú priebehy ťahových kriviek evidentne odlišné. Výsledky jednotlivých výrobcov boli zoradené do tabuľky od najlepšieho po najhoršieho. Pre lepšie porovnanie boli do tabuľky doplnené aj ceny materiálov za kilogram.

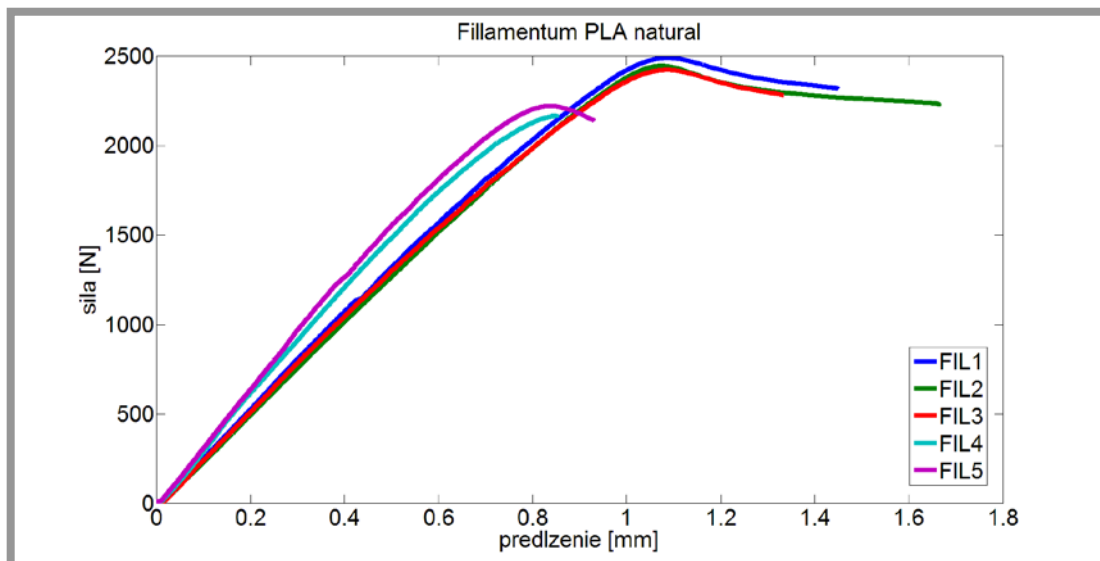
Pre lepšiu prehľadnosť a možnosť spätnej analýzy boli všetky vzorky po vytlačení označené podľa výrobcu a podľa umiestnenia na tlačovej podložke. Vzorky, ktoré boli umiestnené najvyššie na tlačovej podložke dostali označenie 1, spodné vzorky dostali číselné označenie 5 (viď Obr. 26). Napríklad označenie vzorky FIL1 znamená, že bola vyrobená z materiálu od Fillamentum a bola umiestená na hornej pozícii na podložke.

Tab. 4 Porovnanie ceny a mechanických vlastností[24]

<i>Výrobca</i>	<i>Cena (Kč/kg)</i>	<i>Medza pevnosti (MPa)</i>	<i>Modul pružnosti v ťahu (GPa)</i>
<b>Fillamentum</b>	713	58,76±4,50	3,35±0,26
<b>Verbatim</b>	599	57,82±1,38	3,00±0,17
<b>Plasty Mladeč</b>	545	57,74±5,09	3,40±0,30
<b>Eco3D</b>	650	56,95±1,35	3,35±0,14
<b>Devil Design</b>	560	50,52±1,90	3,25±0,20

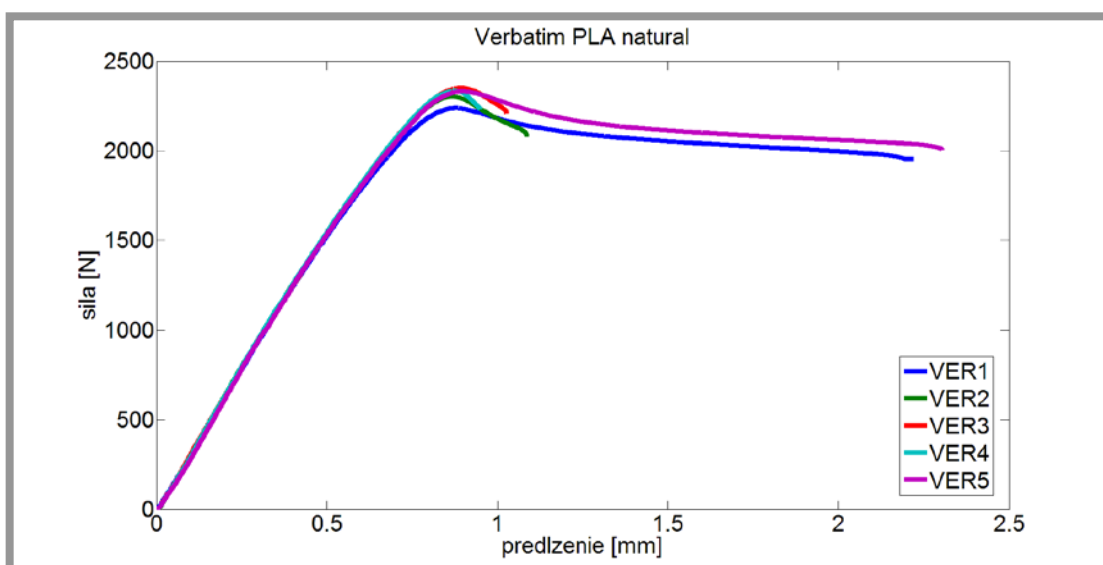
Výrobca Fillamentum je najdrahším spomedzi testovaných, dosiahol však najlepšiu medzu pevnosti. Modul pružnosti síce nie je najvyšší, ale stále je to pomerne vysoká hodnota. Materiál vykazuje veľkú smerodajnú odchýlku, tento rozptyl je však pravdepodobne spôsobený tým, že neboli všetky skúšobné telesá vyrobené z jednej šarže materiálu. Vzorky FIL1, FIL2 a FIL3 boli vyrobené z jednej šarže materiálu, vzorky FIL4 a FIL5 boli vyrobené z druhej šarže. Ako vidieť na Obr. 24, vzorky vyrobené z rovnakej šarže vykazovali podobné deformačné chovanie. Dá sa preto predpokladať, že keby boli všetky skúšobné telesá vyrobené z jednej šarže materiálu, výsledky tohto výrobcu mohli byť oveľa konzistentnejšie.

Výrobcom udávaná medza pevnosti v materiálovom liste je 110 – 145 MPa (merané podľa normy ASTM D882).[23] Ako ukazujú výsledky, tieto informácie neodpovedajú reálnemu požitiu materiálu.



Obr. 24 Ťahové krivky Filamentum

Materiály od výrobcu Verbatim dosiahli druhý najlepší výsledok čo sa týka medze pevnosti, hodnota modulu pružnosti je však podozrivo nízka oproti ostatným výrobcam. Všetky skúšobné telesá boli vyrobené z jednej šarže materiálu, napriek tomu vykazujú vzorky VER1 a VER5 oproti ostatným vzorkám podstatne väčšiu deformáciu pred porušením (Obr. 25).



Obr. 25 Ťahové krivky Verbatim

Jediným faktorom, ktorý spája tieto vzorky je ich umiestnenie na tlačovej podložke, obidve vzorky boli krajné. Teleso VER1 bolo umiestnené najvyššie, VER5 bolo najnižšie (Obr. 26). Je možné, že 3D tlačiareň nebola dobre nakalibrovaná alebo mohla byť zdeformovaná tlačová podložka. Na potvrdenie tejto hypotézy by bolo nutné urobiť ďalšie testy, u iných výrobcov nebol pozorovaný tento trend.

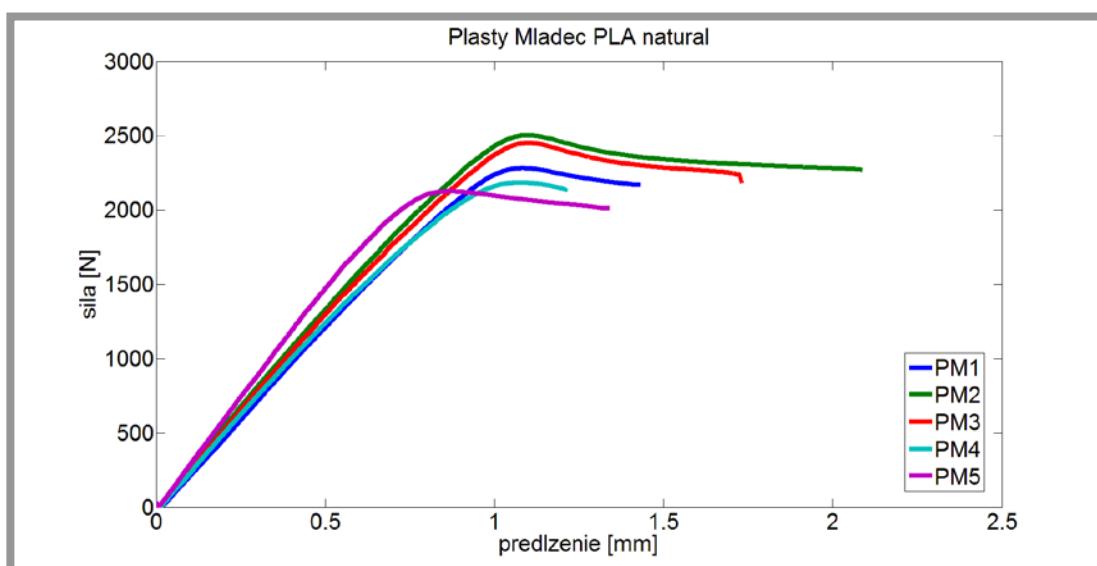
Výrobca udáva medzu pevnosti 63 MPa[28] podľa japonskej normy JIS K7113, dosiahnuté výsledky sú o 8 % nižšie.



Obr. 26 Rozmiestnenie vzoriek Verbatim

Aj napriek tomu, že výrobca Plasty Mladeč je najlacnejším testovaným materiálom, dosiahol relatívne vysokú medzu pevnosti a najvyšší modul pružnosti. Smerodajná odchýlka je síce najväčšia zo všetkých testovaných materiálov, ale treba podotknúť, že to nemusí byť chybou výrobcu. Jednak boli skúšobné telesá vyrábané až zo 4 rôznych šarží materiálu, pričom medzi jednotlivými šaržami teoreticky mohlo dôjsť ku zmene chemického zloženia alebo zmene výrobných parametrov. Navyše niektoré vzorky materiálu neboli doručené v hermeticky uzavretom obale, čo mohlo spôsobiť čiastočnú degradáciu materiálu. Na tieto testy bolo potrebné relatívne malé množstvo materiálu (cca 5 m na jednu vzorku), preto nebolo potrebné kupovať od každého výrobcu celé balenie materiálu. Pre účely tohto experimentu stačilo preto zaobstarať iba vzorky materiálov. Väčšina výrobcov dodáva vzorky svojich materiálov v hermeticky uzavretom obale, aby bola garantovaná výrobná kvalita materiálu. Hermeticky uzavretý obal materiálu je dôležitý z toho dôvodu, že materiály pohlcujú okolitú vlhkosť čím postupne degradujú. Vzorky od ostatných výrobcov prišli v hermeticky uzavretom balení a boli otvorené až pred tlačením.

Výrobcom udávaná medza pevnosti 60 MPa[29] sa ukázala ako reálna aj napriek tomu, že bola meraná podľa normy ASTM D882.

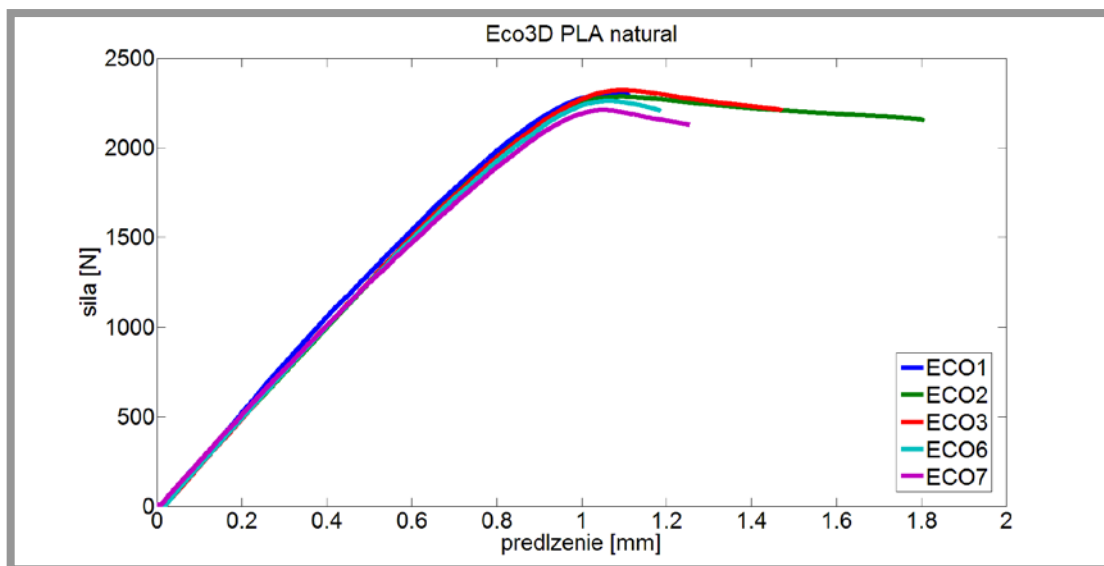


Obr. 27 Ťahové krivky Plasty Mladeč



Výrobca Eco3D je druhý najdrahší výrobca. Nedosiahol síce druhý najlepší výsledok, ale zato dosiahol najvyváženejšie výsledky. Smerodajné odchýlky pri medzi pevnosti ale aj pri module pružnosti sú najmenšie zo všetkých testovaných výrobcov. Treba však podotknúť, že všetky skúšobné telesá boli vytlačené z rovnakej šarže materiálu.

Materiálové listy od tohto výrobcu už nie sú dostupné, nakoľko medzičasom tento výrobca ukončil výrobu filamentov. Preto nie je možné porovnať dosiahnuté výsledky s výrobcom udávanou pevnosťou.



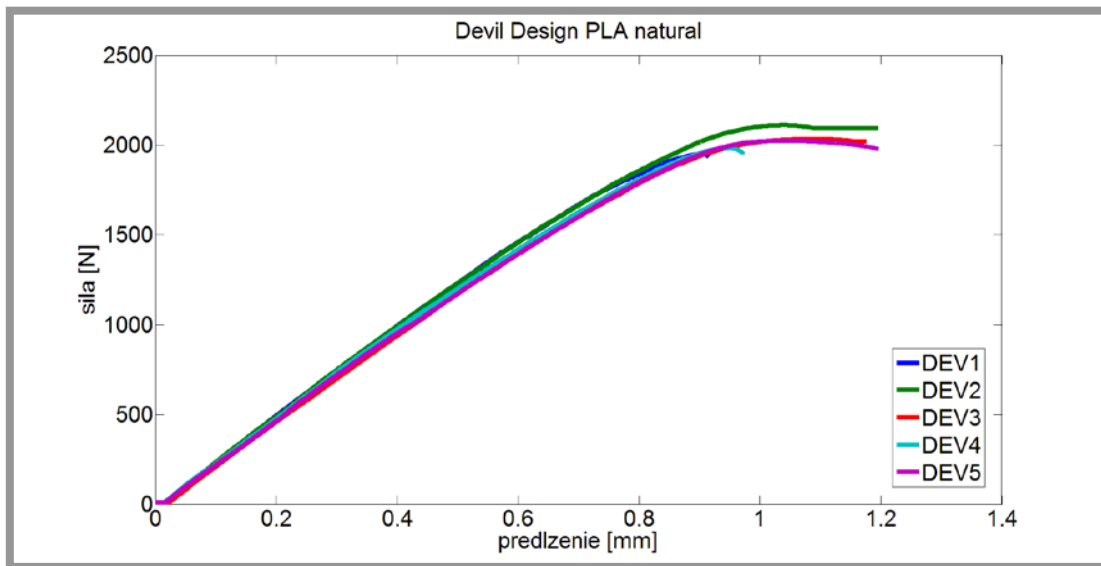
Obr. 28 Ťahové krivky Eco3D

Produkty výrobcu Devil Design sa umiestnili na poslednom mieste čo sa týka dosiahnutej medze pevnosti. Je možné, že tomuto materiálu nevyhovovala nastavená tlačová teplota úplne najlepšie. Výrobca udáva rozpätie tlačových teplôt od 200 °C do 235 °C, tlačová teplota pri výrobe skúšobných telies bola nastavená na 205 °C. Teplota 205 °C bola zvolená tak, aby ležala v doporučenom intervale každého výrobcu. Tento výrobca však má nastavenú hornú medzu intervalu relatívne vysoko (žiaden iný výrobca nemá hornú hranicu teploty tak vysoko), a preto je možné, že pri vyšších teplotách by mal tento materiál lepšie výsledky. Keďže však v čase tlačenia skúšobných telies od tohto výrobcu už bolo vytlačených niekoľko skúšobných telies od iných výrobcov nebola možná zmena teploty, pretože by sa museli všetky dovtedy vyrobené vzorky vyradiť a museli by sa namiesto nich vyrobiť nové. Takisto by sa však mohol potom objaviť problém u iného výrobcu, ktorému by nemusela vyhovovať príliš veľká teplota. Napríklad Fillamentum má hornú hranicu tlačovej teploty iba 210 °C.

Všetky skúšobné telesá boli vyrobené z jednej šarže materiálu a dá sa povedať že jednotlivé ťahové krivky sú veľmi podobné (Obr. 29).

Výrobca Devil Design neudáva medzu pevnosti.





Obr. 29 Ťahové krivky Devil Design

## 7 ZÁVER

Táto práca bola zameraná na porovnanie mechanických vlastností PLA materiálu od 5 rôznych výrobcov. Pred začatím samotného experimentu bolo nutné zhrnúť doterajšie poznatky o mechanických vlastnostiach materiálov používaných v FDM 3D tlači v závislosti na rôznych nastaveniach tlače. Po zvážení všetkých faktorov ovplyvňujúcich výslednú medzu pevnosti bol nastavený výber materiálu a tlačových nastavení tak, aby boli dosiahnuté čo najvyššie výsledky medze pevnosti. Taktiež bolo potrebné zdefinovať normu, podľa ktorej bude experiment prebiehať, počet vzoriek, spôsob skúšania a postup pri vyhodnocovaní informácií. Pre tento experiment bola zvolená norma ISO 527-2. Je to norma na skúšanie mechanických vlastností tvárnených a vstrekovaných plastov.

Po ukončení mechanických skúšok a po následnom štatistickom spracovaní výsledkov sa ukázalo, že rozdiely v intervaloch medze pevností jednotlivých výrobcov rozhodne nemožno prehlásiť za zanedbateľné. Ukázalo sa, že medzi najlepším a najhorším výrobcom je rozdiel takmer 15 %. Čo sa týka výslednej medze pevnosti, tak najlepšie výsledky dosiahol výrobca Fillamentum. Najlepší modul pružnosti dosiahol výrobca Plasty Mladeč.

Keďže v tejto práci bola skúmaná iba farebná varianta natural, otvára sa priestor na ďalšie bádanie ohľadom mechanických vlastností iných farebných variánt. V budúcnosti by bolo dobré porovnať napríklad 5 rôznych farieb medzi dvoma výrobcami a zistiť tak rozdiely medzi farebnými variantami jedného výrobcu a druhého výrobcu. Tu by sa tiež mohli ukázať celkom zaujímavé výsledky, pretože výrobcovia môžu používať rôzne farbiace aditíva, ktoré môžu mať rôzny vplyv na mechanické vlastnosti. Ďalším dôvodom prečo by bolo dobré zamerať sa na rôzne farby je, že farba natural nie je používaná až tak často. Väčšina používateľov uprednostňuje farebné materiály.

Taktiež bol pozorovaný trend, že vzorky ktoré neboli vyrobené z jednej šarže materiálu vykazovali odlišné deformačné správanie a dosahovali rozličné medze pevností. To otvára priestor na ďalší výskum, kde by bolo dobré v spolupráci s výrobcom filamentov priamo zisťovať, ktoré parametre pri výrobe filamentu ovplyvňujú výsledné mechanické vlastnosti. Je možné, že medzi jednotlivými šaržami materiálov dochádzalo k zmene chemického zloženia alebo boli menené procesné parametre.

Všetky ciele tejto bakalárskej práce boli splnené.

**8 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY**

- [1] PALERMO, Elizabeth. *Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method* [online]. [vid. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [2] *How much do 3D printers cost? What is the actual running cost of a 3D printer?* [online]. [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.tripodmaker.com/2017/04/04/how-much-do-3d-printers-cost/>
- [3] *Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG* [online]. [vid. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [4] LETCHER, Todd, Behzad RANKOUHI a Sina JAVADPOUR. Experimental Study of Mechanical Properties of Additively Manufactured ABS Plastic as a Function of Layer Parameters. *Volume 2A: Advanced Manufacturing* [online]. 2015, (October 2016), V02AT02A018. Dostupné z: doi:10.1115/IMECE2015-52634
- [5] *Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA)* [online]. [vid. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>
- [6] LUDEK PTACEK A KOLEKTIV. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 8072042483.
- [7] *Polylactic Acid (PLA) Typical Properties | UL Prospector* [online]. [vid. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing>
- [8] CHACÓN, J. M., M. A. CAMINERO, E. GARCÍA-PLAZA a P. J. NÚÑEZ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design* [online]. 2017, **124**, 143–157. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065
- [9] *Polylactic Acid (PLA, Polylactide) :: MakeItFrom.com* [online]. [vid. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide>
- [10] LETCHER, Todd a Megan WAYTASHEK. Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer. *Volume 2A: Advanced Manufacturing* [online]. 2014, (October), V02AT02A014. Dostupné z: doi:10.1115/IMECE2014-39379
- [11] *Materials — Large Scale 3D Printing - Cosine* [online]. [vid. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.cosineadditive.com/materials/>
- [12] *PLA 3D Printing Filament - Everything you need to know* [online]. [vid. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://rigid.ink/blogs/news/3d-printing-basics-how-to-get-the-best-results-with-pla-filament>
- [13] *PETG Filament for 3D Printing - Explained & Compared | All3DP* [online]. [vid. 2018-02-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>
- [14] KRATOCHVÍL, T. *3D FDM tiskárna rerap a parametry tisku*. B.m., 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [15] NOVAKOVA MARCINCINOVA, Ludmila a Jozef NOVAK MARCINCIN.

- Verification of Mechanical Properties of ABS Materials used in FDM Rapid Prototyping Technology. *Proceedings in Manufacturing Systems*. 2013, **8**(2), 87–92. ISSN 2067-9238.
- [16] *Everything You Need to Know About ABS Plastic* [online]. [vid. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>
- [17] *rozdiel medzi ABS a PLA* [online]. [vid. 2018-01-18]. Dostupné z: <http://tvaroch.sk/blog/rozdiel-medzi-abs-pla/>
- [18] FERNANDEZ-VICENTE, Miguel, Wilson CALLE, Santiago FERRANDIZ a Andres CONEJERO. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2016, **3**(3), 183–192. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2015.0036
- [19] TYMRAK, B. M., M. KREIGER a J. M. PEARCE. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design* [online]. 2014, **58**, 242–246. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2014.02.038
- [20] HABEEB, H A, M R ALKAHARI, F R RAMLI, R HASAN a S MAIDIN. Strength and porosity of additively manufactured PLA using a low cost 3D printing. 2016, **1**(March), 69–70.
- [21] WITTBRODT, Ben a Joshua M. PEARCE. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **8**, 110–116. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2015.09.006
- [22] *Technical data sheet PLA*. nedatováno.
- [23] *Datasheet PLA-Extrafill*. nedatováno.
- [24] *PLA filament pro 3d tisk na zakázku i hobby použití* [online]. [vid. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/pla-1-75/>
- [25] *Dreamer – Tech Specs – FlashForge 3D Printers* [online]. [vid. 2018-01-23]. Dostupné z: <http://www.flashforge.com/dreamer-3d-printer/tech-specs/>
- [26] *Print Quality Troubleshooting Guide | Simplify3D Software* [online]. [vid. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#not-extruding-enough-plastic>
- [27] ISO. *BS EN ISO 527-2:1996: Plastics — Determination of tensile properties - Part 2 Test conditions for moulding and extrusion plastics* [online]. 1996. Dostupné z: [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Plastics+—+Determination+of+tensile+properties+—+  
#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Plastics—Determination+of+tensile+properties—%230](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Plastics+—+Determination+of+tensile+properties+—+#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Plastics—Determination+of+tensile+properties—%230)
- [28] *Vlákno Verbatim PLA 1,75mm 1 kg - Natural | Vlákno Verbatim PLA 1,75mm 1 kg | Verbatim Online Shop* [online]. [vid. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.verbatim-europe.cz/cz/prod/verbatim-pla-filament-1-75mm-1kg-natural-transparent-55274/>
- [29] *Datasheet Plasty Mladec PLA*. nedatováno.
- [30] *3D Printing Technologies | Types of 3D Printing | Rookie Electronics | Electronics & Robotics Projects* [online]. [vid. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://rookieelectronics.com/3d-printing-technologies-types/>

**9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN**
**9**


---

<b>Symbol/skratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
A	[mm <sup>2</sup> ]	počiatočný prierez
E	[GPa]	Youngov modul pružnosti v ťahu
$\epsilon$	[-]	pomerné predĺženie
F <sub>m</sub>	[N]	maximálna zaťažujúca sila
$\Delta l$	[mm]	zmena dĺžky pri zaťažení
l	[mm]	pôvodná dĺžka
m	[-]	priemer
s	[-]	smerodajná odchýlka
T <sub>g</sub>	[°C]	teplota skleneného prechodu
T <sub>t</sub>	[°C]	teplota tavenia
$\sigma$	[MPa]	napätie
$\sigma_m$	[MPa]	medza pevnosti
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	hustota
3D		troj-dimenzionálny
ABS		Akrylonitrilbutadiénstyrén
ASTM		American Society for Testing and Materials
CAD		Computer Aided Design
FDM		Fused Deposition Modelling
FFF		Fused Filament Fabrication
FLM		Fused Layer Modelling
ISO		International Organization for Standardization
JIS		Japanese Industrial Standards
PLA		Polylactid Acid – Polymliečna kyselina

## 10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

<b>Obr. 1</b> Princíp FDM 3D tlače [30]	13
<b>Obr. 2</b> Využitie PLA pri výrobe prototypov[15]	14
<b>Obr. 3</b> Forma na vstrekovanie plastov[19]	15
<b>Obr. 4</b> Vyhladzovanie ABS pomocou acetónu[7]	16
<b>Obr. 5</b> Ťahové diagramy PLA a ABS[21]	16
<b>Obr. 6</b> Rozdiel medzi vzorom výplne a hustotou výplne[22]	17
<b>Obr. 7</b> Orientácia výplne: 0°(hore), 90°(stred) a 45°(dole)[11]	17
<b>Obr. 8</b> Výsledky ťahovej skúšky pre rôzne orientácie výplne[11]	18
<b>Obr. 9</b> Vplyv vzoru výplne na výslednú medzu pevnosti[18]	18
<b>Obr. 10</b> Orientácia výtlačku[24]	19
<b>Obr. 11</b> Medza pevnosti v závislosti na orientácii výtlačku a na výške vrstvy[9]	19
<b>Obr. 12</b> Rozdielne výšky vrstvy[25]	20
<b>Obr. 13</b> Dosahované medze pevnosti na základe výšky vrstvy[19]	20
<b>Obr. 14</b> Vplyv výšky vrstvy na výslednú medzu pevnosti[27]	20
<b>Obr. 15</b> Rôzne farby filamentov[14]	21
<b>Obr. 16</b> Medza pevnosti v závislosti na farbe materiálu[28]	21
<b>Obr. 17</b> 3D tlačiareň Flashforge Dreamer[32]	23
<b>Obr. 18</b> Nedostatočný objem vytlačaného materiálu[26]	24
<b>Obr. 19</b> Skúšobné teleso 1A podľa normy ISO 294-1[33]	25
<b>Obr. 20</b> Ťahová skúška	26
<b>Obr. 21</b> Skúšobné telesá po ukončení testov	27
<b>Obr. 22</b> Grafické znázornenie intervalu medze pevnosti	27
<b>Obr. 23</b> Grafické znázornenie intervalov modulu pružnosti	28
<b>Obr. 24</b> Ťahové krivky Fillamentum	30
<b>Obr. 25</b> Ťahové krivky Verbatim	30
<b>Obr. 26</b> Rozmiestnenie vzoriek Verbatim	31
<b>Obr. 27</b> Ťahové krivky Plasty Mladeč	31
<b>Obr. 28</b> Ťahové krivky Eco3D	32
<b>Obr. 29</b> Ťahové krivky Devil Design	33

**11 ZOZNAM TABULIEK****11**

---

<b>Tab. 1</b> Prehľad Mechanických a fyzikálnych vlastností PLA (merané pri teplote 23°C) [5, 7–11]	14
<b>Tab. 2</b> Prehľad mechanických a fyzikálnych vlastností ABS (merané pri teplote 23°C) [3, 11, 15, 16]	15
<b>Tab. 3</b> Použité nastavenia tlače	24
<b>Tab. 4</b> Porovnanie ceny a mechanických vlastností[24]	29

## **12 ZOZNAM PRÍLOH**

---

**Príloha 1:** Protokol z ťahovej skúšky 2017

**Príloha 2:** Protokol z ťahovej skúšky 2018



## PROTOKOL Z ŤAHOVEJ SKÚŠKY 2017

Protokol o zkoušce tahem

05.05.2017

VUT FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

### Zkušební parametry:

Zadavatel :	Snímač síly :
Imatrikulace / Typ: OK - 4075	Průtahoměr :
Materiál :	Upínací čelisti :
Zkušební stroj : ZWICK Z020	Rychlost zkoušky: 3 mm/min

### Výsledky zkoušek:

Nr	Vzorek	E modul N/mm <sup>2</sup>	F max N	Rm N/mm <sup>2</sup>
1	ECO1	3300,19	2305,58	57,64
2	ECO2	3239,37	2286,97	57,17
3	ECO3	3392,37	2322,95	58,07
4	ECO6	3532,64	2262,59	56,56
5	ECO7	3304,75	2211,65	55,29
6	DEV1	3049,79	1948,73	48,72
7	DEV2	3234,73	2111,93	52,80
8	DEV3	3398,77	2034,09	50,85
9	DEV4	3436,27	1984,26	49,61
10	DEV5	3141,45	2024,67	50,62
11	FIL1	3662,55	2491,22	62,28
12	FIL2	3303,78	2446,71	61,17
13	FIL3	3457,65	2424,16	60,60
14	PM1	3246,19	2282,13	57,05
15	PM2	3718,53	2503,20	62,58
16	PM3	3477,92	2451,30	61,28
17	PM4	3453,77	2184,75	54,62

Zkoušel: -

## PROTOKOL Z ŤAHOVEJ SKÚŠKY 2018

Protokol o zkoušce tahem

04.05.2018

VUT FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

### Zkušební parametry:

Zadavatel	:		Snímač síly	:	
Imatrikulace / Typ	:	OK - 4075	Průtahoměr	:	
Materiál	:		Upínací čelisti	:	
Zkušební stroj	:	ZWICK Z020	Rychlost zkoušky	:	3 mm/min

### Výsledky zkoušek:

Nr	Vzorek	E modul N/mm <sup>2</sup>	F max N	Rm N/mm <sup>2</sup>
1	VER1	2934,43	2239,67	55,99
2	VER2	3213,85	2304,29	57,61
3	VER3	2974,10	2351,81	58,80
4	VER4	3013,30	2335,05	58,38
5	VER5	2844,42	2332,40	58,31
6	FIL4	3207,31	2167,42	54,19
7	FIL5	3133,60	2222,91	55,57
8	PM5	3078,71	2126,01	53,15

Zkoušel: -