



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# POROVNÁNÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERNÍCH VZORKŮ VYROBENÝCH METODAMI 3D TISKU NA PRINCIPU EXTRUZE

COMPARISON OF TENSILE PROPERTIES OF POLYMERIC SAMPLES PRODUCED BY EXTRUSION BASED  
3D PRINTING

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ivo Krajcar

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Škaroupka, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Ivo Krajcar</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. David Škaroupka, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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:

## **Porovnání tahových vlastností polymerních vzorků vyrobených metodami 3D tisku na principu extruze**

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

Podstatou práce je experimentální ověření tahových vlastností vybraných polymerních materiálů vyrobených 3D tiskem na principu extruze a jejich ověření vůči plně extrudovaným vzorkům ze stejného materiálu. Vzorky budou vyrobeny technologiemi FDM/FFF (fused deposition modeling/fused filament fabrication), APF (ARBURG Plastic Freeforming) a vstřikováním do formy.

Typ práce: výzkumná

### **Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem je porovnání mechanických vlastností 3D tištěných polymerních vzorků vůči vzorkům plně extrudovaným.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- výběr polymerního filamentu,
- návrh experimentů a testovacích vzorků,
- výroba vzorků a provedení tahových zkoušek,
- vyhodnocení a porovnání tahových vlastností testovaných vzorků.

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\\_2019.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf)

### Seznam doporučené literatury:

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 & Design*. 2014, (58), 242-246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>. ISSN 0261-3069.

WU, W., P. GENG, G. LI, D. ZHAO, H. ZHANG a J. ZHAO. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*. 2015, 8(9), 5834-5846. DOI: 10.3390/ma8095271. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/9/5271>.

JELÍNEK, J. Analýza mechanických vlastností plastových materiálů pro 3D tisk. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

KREJBYCHOVÁ, A. Analýza mechanických vlastností plastových dílů realizovaných 3D tiskem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

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.

GIBSON, I., ROSEN D. W., STUCKER B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá shrnutím současných znalostí o 3D tisku a mechanických vlastnostech takto vyrobeného prototypu. Hlavním cílem je porovnat hojně používanou metodu FDM s inovativní metodou 3D tisku od společnosti Arburg (APF). Pro zkoumání této metody byly vybrány materiály ASA a CPE, na těchto materiálech byla zkoumána pevnost v tahu. Pro porovnání mezi těmito dvěma metodami, byly navíc vyrobeny referenční vzorky metodou vstřikování plastů. Vůči těmto vzorkům bylo porovnáno, o kolik má daný díl procentuálně vyšší či nižší pevnost. Za účelem porovnání těchto metod mezi sebou bylo celkově vyrobeno 60 vzorků. Po vyhodnocení bylo zjištěno, že metoda APF je přibližně o 30 % méně pevná než referenční vzorek, metoda FDM při porovnání s referenčním díle je přibližně stejně pevná.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Arburg Freeformer, FDM, APF, testování mechanických vlastností, 3D tisk, Rychlá výroba prototypů, zkouška tahem, CPE, ASA, Rapid prototyping

## ABSTRACT

The subject of this work is a summary of the contemporary knowledge about 3D printing and mechanical properties of a prototype manufactured this way. Main goal is to compare the frequently used FDM method with the innovative APF method of 3D printing from the Arburg company. ASA and CPE materials were chosen for researching this method. On these materials, tensile strength was measured. Additionally, for comparison between the two methods, referential samples manufactured by injection moulding were made. A percentual difference in strength of each sample was compared against these. 60 samples in total were made for this comparison. After evaluation of the results, it was found that in the tensile strength the samples made by the APF method are approximately 30 % less strong than the referential sample. The samples made by the FDM method are approximately of the same strength as the referential sample.

## KEYWORDS

Arburg Freeformer, FDM, APF, testing of mechanical properties, 3D printing, Rapid prototyping, tensile strength, CPE, ASA, tensile test, Rapid prototyping



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Krajcar, Ivo. *Porovnání tahových vlastností polymerních vzorků vyrobených metodami 3D tisku na principu extruze*. Brno, 2019, 62 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Škaroupka, Ph.D.





## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi pomáhali při vypracování této práce. Zejména děkuji panu Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D. za zprostředkování materiálových zkoušek pro tuto práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Marku Zlochovi z firmy Arburg za vyrobení zkušebních tělísek. Taktéž bych chtěl poděkovat doc. RNDr. Liboru Žákovi Ph.D. za pomoc při zpracování naměřených dat. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Fillamentum za poskytnutý materiál použitý pro testování.

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Josefu Dolečkovi ze společnosti Fillamentum za zajištění materiálů a podstatné části vzorků pro tuto práci. Dále bych chtěl poděkovat mojí rodině a známým za podporu při studiu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Škaroupky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne.....

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Materiály používané pro 3D Tisk	14
2.1.1	CPE	15
2.1.2	ASA	16
2.1.3	Porovnání CPE a ASA	17
2.1.4	Vliv barvy materiálu	17
2.2	Vliv parametrů na výsledné mechanické vlastnosti	18
2.2.1	Vliv vnitřní výplně	19
2.2.2	Typy vnitřních výplní a jejich mechanické vlastnosti	19
2.2.3	Orientace výtisku	21
2.2.4	Výška vrstvy	22
2.3	Použité technologie	24
2.3.1	Arburg Plastic freeforming (APF)	24
2.3.2	Fused Deposition Modelling (FDM)	26
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>27</b>
3.1	Cíle Práce	27
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>29</b>
4.1	Materiál	29
4.2	Použité 3D tiskárny a nastavení tisku	29
4.3	Metodika testování a vyhodnocení	32
4.3.1	Definice meze pevnosti $\sigma_m$	34
4.3.2	Tvorba krčku	34
4.3.3	Příprava na testování	35
4.3.4	Tahová zkouška	35
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>36</b>
5.1	Výsledky tahové zkoušky	36
5.1.1	Mez pevnosti $\sigma_m$	37
5.1.2	Porovnání jednotlivých metod mezi sebou	37
5.1.3	Tahové diagramy pro jednotlivé metody a materiály	37
5.1.4	Pohled na lomové plochy	40

<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>54</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>56</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>58</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>59</b>
<b>13</b>	<b>PROTOKOL Z TAHOVÉ ZKOUŠKY</b>	<b>60</b>

# 1 ÚVOD

3D tisk se v poslední době stal hojně používanou metodou výroby prototypů, používá ho jak laická veřejnost tak i odborná veřejnost. 3D tisk se používá nejčastěji pro prototypování, výrobu funkčních dílu, montážních přípravků. 3D tiskem lze vyrobit i náhradní díly pro dnes už výrobci nepodporované spotřebiče.

Pro laickou veřejnost jsou nejvíce známe tyto dvě metody 3d tisku, Fused Deposition modeling (FDM), nebo také metoda SLA (Stereolitografie). Metoda FDM vznikla v 80 letech 20 století, výrazně se stala cenově dostupnou až 10 – 15 let zpátky. Je to z toho důvodu že neexistovaly algoritmy pro přípravu 3D modelu pro tisk. Dalším důvodem, proč se technologie začala tak rychle šířit je vypršení patentu na tuto metodu tisku.

Nejpoužívanějšími materiály pro 3D tisk jsou PLA (Polylactid Acid – kyselina polymléčná), ABS (Akrylonitrilbutadiénstyren ), tyto dva plasty mají tavicí teplotu přibližně okolo 210 °C .Pro výrobu funkčních dílu je potřeba vědět jak budou namáhány, v jakém prostředí se budou nacházet. Pro spolehlivou funkci takto vyrobených dílu potřebujeme vědět mechanické vlastnosti, kterých lze touto metodou dosáhnout. Proto je nesmírně důležité jednotlivé metody a materiály testovat.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

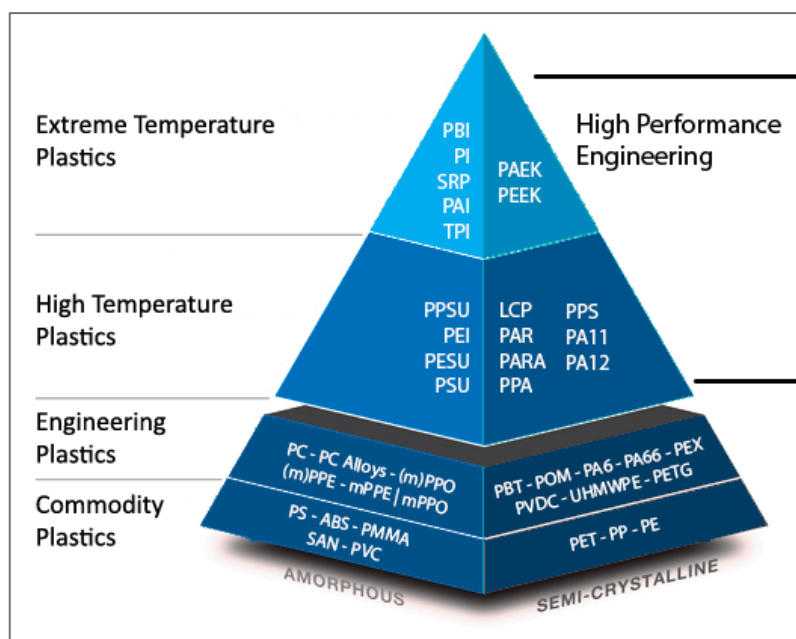
3D tisk v patří mezi aditivní technologie výroby. To znamená, že výrobek nevzniká odebráním materiálu jako u klasických metod obrábění, ale naopak jeho přidáváním v jednotlivých vrstvách. Pojem 3D tisk zahrnuje velké množství typů technologií, které pracují s různými materiály (plast, kov, sklo, keramika, beton ...).

V současné době existuje mnoho technologií 3D tisku ale nejrozšířenější je metoda FDM [1].

### 2.1 Materiály používané pro 3D Tisk

Pro 3D tisk se používají plasty ze skupiny termoplastů. Termoplast je plastická hmota, která se po ohřátí nad určitou teplotu stává poddajnou či tvarovatelnou a po ochlazení se vrací zpět do pevného stavu, přičemž tyto změny tvárnosti mohou nastávat opakovaně. Termoplasty jsou polymery, tedy lineární molekuly složené do řetězců, jež jsou mezi sebou drženy prostřednictvím mezimolekulárních sil, jako jsou Van der Waalsovy síly a vodíkové můstky. Tyto síly umožňují termoplastům být opětovně tvarovány, protože mezimolekulární interakce se zvyšuje s ochlazováním a poskytuje obnovu objemových vlastností. Tímto způsobem se termoplasty liší například od termosetových polymerů neboli reaktoplastů, jejichž chemické vazby jsou v průběhu vytvrzování nevratné. Teplotní rozsah tání běžných termoplastů se pohybuje mezi 100 °C a 130 °C. Protože se termoplasty řadí mezi semi-krytalické materiály, nezměkčují se zvyšováním teploty, místo toho zůstávají pevné, dokud nedojde k absorpci daného množství tepla. Poté se rychle přemění na nízkoviskózní kapalinu. Většina termoplastů má vysokou molekulovou hmotnost [2] [3].

Termoplasty se dále dělí na polyolefiny, fluoroplasty, vinylové plasty, akrylátové plasty, polyestery, polykarbonáty, acetátové plasty a polyamidy. Tato práce je zaměřena na materiály CPE a ASA, které spadají do skupiny polyesterů a styrenů, jejichž společným znakem je přítomnost esterových nebo styrenových vazeb v hlavním řetězci makromolekuly. Jedna z nejdůležitějších charakteristik, které nás u termoplastů zajímají je teplota skelného přechodu. Po překročení teploty skelného přechodu materiál měkne a ztrácí své mechanické vlastnosti [4].



Obr 1 Rozdělení plastů [3]

### 2.1.1 CPE

**CPE** neboli kopolyester je speciální materiál na bázi kyseliny tereftalové, který je svou výbornou odolností předurčený pro technické využití, zejména pro tisk funkčních prototypů a mechanických součástí. S CPE lze dosáhnout kvalitního a snadného tisku. Jedná se o vylepšený PET (PETG) filament, který má lepší užitné vlastnosti [5].

tab. 1 Vlastnosti materiálu [6].

Fyzikální veličina	Hodnota	Měřené dle
Hustota $\rho$	1,25 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Mez pevnosti	48 MPa	ASTM D638
Modul pružnosti v tahu E	1860 MPa	ASTM D790
Teplota skelného přechodu	90 °C	ASTM D1525
Teplotní odolnost	80 °C	ASTM D648
Teplota tisku	255-275 °C	

Propustnost světla	90%	ASTM 1003
--------------------	-----	-----------

**Použití CPE:** Obecně se CPE používá v obalovém průmyslu a čím dál více se dostává do běžného používání. CPE v 3D tisku se používá pro prototypování, tisk měřících přípravků, tisk funkčních modelů, tisk funkčních dílu na výrobní linky [7].

## 2.1.2 ASA

**ASA (akrylonitril-styren-akryl)** - Byl vytvořen jako alternativa k ABS, se zvýšenou odolností proti povětrnostním podmínkám. Je to vysoce kvalitní konstrukční termoplast s vynikající odolností proti UV záření. Výhodou tohoto materiálu je dobrá mechanická odolnost, tuhost, odolnost proti teplotě, jednoduchá zpracovatelnost na 3D tiskárnách, kvalita tisku i při náročných detailech i pro malé objekty, výborné vrstvení tisknutého objektu, vynikající odolnost proti povětrnostním vlivům a zachování fyzikálních vlastností. ASA má nízkou hladinu žloutnutí, což je velmi důležité pro aplikace, kde je dlouhodobě kladen důraz na vzhled. Další výhodou je jeho dobrá rozměrová stabilita. Je vhodný pro tiskárny založené na FFF/FDM technologii [8].

tab. 2 Vlastnosti materiálu [9]

Fyzikální veličina	Hodnota	Měřené dle
Hustota $\rho$	1,07 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Mez pevnosti	40 MPa	ASTM D638
Modul pružnosti v tahu E	1726 MPa	ASTM D790
Teplota skelného přechodu	100 °C	ASTM D1525
Teplotní odolnost	90 °C	ASTM D648
Teplota tavení	200-230 °C	
Teplota tisku	250-265 °C	

**Použití ASA:** Obecně se ASA nejvíce používá na modely, které se budou nacházet ve venkovním prostředí, kde na ně bude působit UV záření. Další využití materiálu ASA je u různých konstrukčních modelů, které jsou teplotně namáhány. ASA se také používá pro tisk funkčních dílů na robotická pracoviště, výrobní linky, modely soch [8].



### 2.1.3 Porovnání CPE a ASA

Každý materiál má své výhody a nevýhody, proto je potřeba při použití jednoho či druhého materiálu určit co od následného modelu očekáváme a při jaké teplotě a zatížení se bude model nacházet. Cena za materiál ASA je okolo 670 Kč/kg a cena za CPE je okolo 1210 Kč/kg [10]. CPE je vhodný materiál pro tisk v kanceláři, protože na rozdíl od ASA neuvolňuje žádné aromatické částice, které by zapáchaly. Mezi hlavní výhody CPE patří dobré mechanické vlastnosti a vysoká rázová houževnatost, další výhodou CPE je, že se s ním tiskne stejně snadno jako s PLA. Mezi nevýhody se řadí fakt, že CPE není odolné vůči UV záření [8] [5].

ASA je jeden z mála polymerů používaných v 3D tisku, který je odolný vůči UV záření a povětrnostním vlivům. Další výhodou ASA je že má o 10 °C vyšší teplotu skelného přechodu, než CPE. Přínosné také je, že jde slepit a opracovat acetonem. Mezi nevýhody ASA se řadí stejná obtížnost tisknutí jako u ABS. CPE má vyšší pevnost v tahu než ASA, dále má také větší hustotu [5] [8].

### 2.1.4 Vliv barvy materiálu

V dnešní době existují stovky barev, které výrobci nabízí ke koupi (viz Amazon a jiné e-shopy). Na zakázku si lze objednat i materiál s přesně daným RAL odstínem [11]. Nejvíce barevných variant je u PLA a PET-G materiálů, ostatní materiály jsou spíše technického charakteru kde uživatel neklade důraz na barvu, ale požaduje co nejlepší pevnostní vlastnosti (důvod proč nejsou materiály jako je Nylon, PEEK, PEI v různých barevných variantách) [12].



**Obr. 2** Různé barevné možnosti jednoho materiálu [13]

Jak ukázal experiment Wittbrodt [13] barva materiálu výrazně ovlivňuje pevnost materiálu. Nejlépe z testu vyšla barva ve verzi natural, v které nejsou přidány žádné pigmenty. Nejhůře dopadla šedá barva, která měla o 10 % menší pevnost.

tab.3 Jednotlivé vlastnosti v závislosti na barvě materiálu [13]

Color	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Maximum strain (%)	Crystallinity (%)
Natural	57.16 ± 0.35	52.47 ± 0.35	2.35 ± 0.05	0.93 ± 0.06
Black	52.81 ± 1.18	49.23 ± 1.18	2.02 ± 0.08	2.62 ± 0.09
Gray	50.84 ± 0.23	46.08 ± 0.23	1.98 ± 0.04	4.79 ± 0.10
Blue	54.11 ± 0.30	50.10 ± 0.30	2.13 ± 0.02	4.85 ± 0.15
White	53.97 ± 0.26	50.51 ± 0.26	2.22 ± 0.04	5.05 ± 0.18

Tyto rozdíly jsou rozdíly v pevnosti jsou způsobeny zejména tím, že částice barviva částečně ovlivňují homogenitu samotného polymeru, ovlivňují jeho tečení a vytváří póry, barva výrazně ovlivňuje krystalinitu, což má vliv na pevnost. Tyto výsledky se mohou lišit mezi různými výrobci materiálu a dokonce mezi jednotlivými materiály [13].

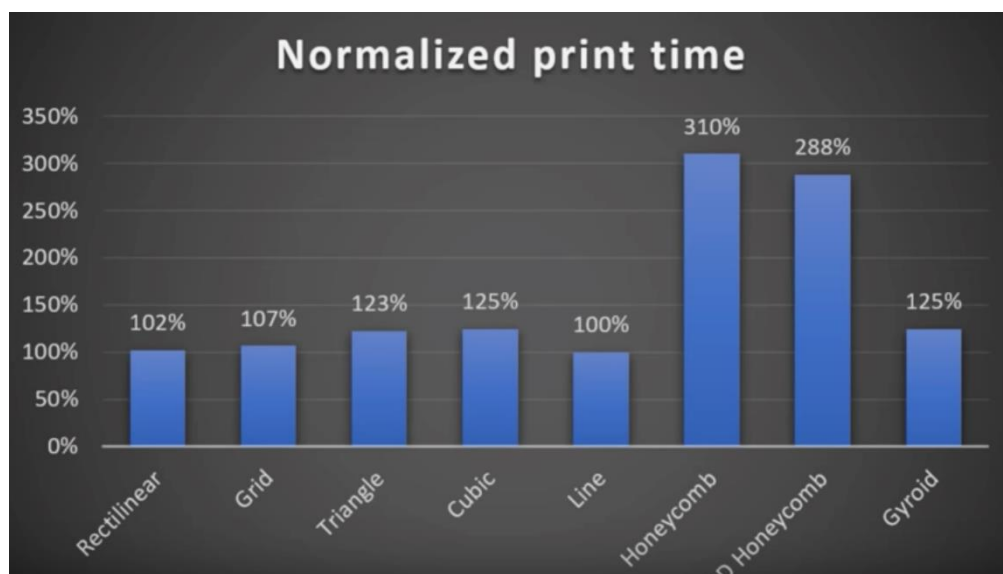
## 2.2 Vliv parametrů na výsledné mechanické vlastnosti

Výslednou kvalitu výtisku ovlivňuje mnoho procesních faktorů: kvalita materiálu, pigmenty ve filamentu nebo plnění materiálů. Dále výsledné mechanické vlastnosti ovlivňují procesní parametry při tisku (styl výplně - hustota a tvar, tisková teplota, chlazení při tisku, orientace modelu při tisku, výška vrstvy, teplota při tisku, rychlost tisku, přesnost sestavení tiskárny a mnoho dalších parametrů). Dále můžeme mechanické vlastnosti ovlivnit při přípravě dat pro 3D tiskárnu ve *sliceru*. Ve *sliceru* můžeme nastavit procesní parametry pro kteroukoliv vrstvu. *Slicer* nám při tvorbě .gcode-u napíše jak dlouho se daný model bude tisknout a kolik bude potřeba materiálu [14].

## 2.2.1 Vliv vnitřní výplně

Jedním z nejdůležitějších parametrů při 3D tisku je typ a hustota vnitřní výplně modelu. V dnešní době většina *slicerů* nabízí velké množství typů vnitřních výplní např. Slicer PE nabízí 13 druhů vnitřní výplně. Některé výplně mají spíše estetickou funkci, jiné zase vykazují vysoké pevnostní charakteristiky vůči ostatním, u jednotlivých výplní záleží na orientaci tisknutého dílu a orientaci následného zatěžování. Existují výplně, které mají dobré pevnostní charakteristiky jen v určitých směrech 2D výplně např. *rectilinear*, dále zde existují i výplně které zaručí danému výtisku stejné pevnostní charakteristiky ve všech směrech 3D výplně např. *Gyroid* [15].

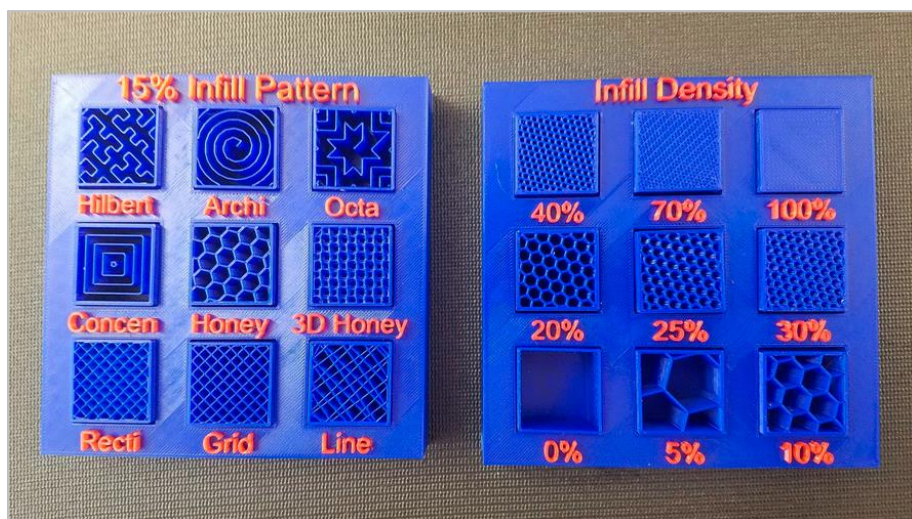
Tisk vnitřní výplně má také zásadní vliv na délku tisku [16].



Obr. 3 Porovnání délky tisku na typu vnitřní výplně [16].

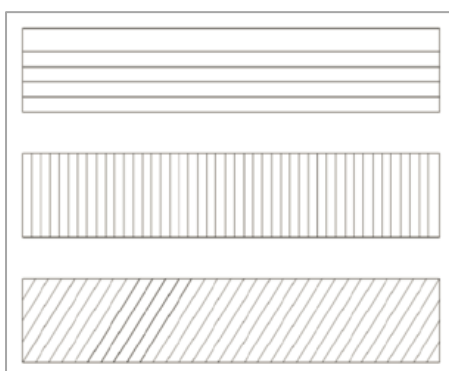
## 2.2.2 Typy vnitřních výplní a jejich mechanické vlastnosti

Výtisky z 3D tiskárny se většinou netisknou se 100 % výplní, protože je to časově náročné a z tohoto důvodu se většinou všechny modely tisknou duté nebo částečně duté. Nejčastěji se používá vnitřní výplň s 5-30% hustotou (viz fórum 3D tisk). Nejzákladnějším typem výplně, který se používá je *rectilinear*. Tento typ výplně bývá nastaven tak, že výplň vypadá jako jsme šrafovaní pod úhlem 45° a 90°. V současné době se čím dál více používá výplň typu *gyroid*, která u výtisku zajišťuje, že se model deformuje ve všech směrech stejně [17]. Většina tiskařů volí typ výplně a procentuální hustotu podle zkušeností, které získali během své praxe, dále volí parametry tisku podle předpokládané zátěže modelu.



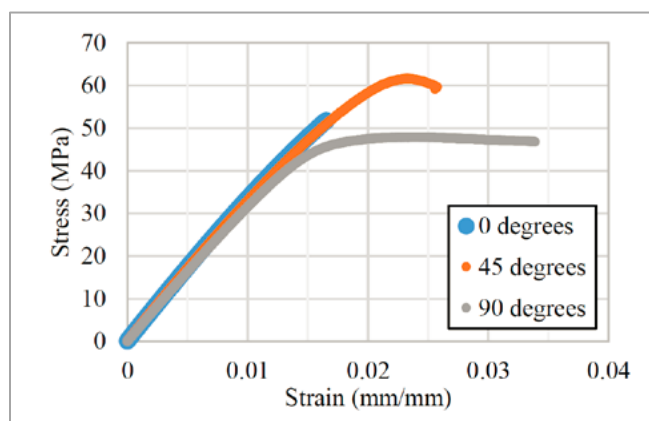
Obr. 4 Ukázka typů výplní a hustoty výplně [18].

Letcher [19] se zaměřili na porovnání různých typů orientace výplně z jeho výsledků vychází, že výplň pod uhlím  $45^\circ$  (vzhledem k zátěžové síle), vykazuje nejvyšší pevnost v tahu vůči jiným orientacím výplně.



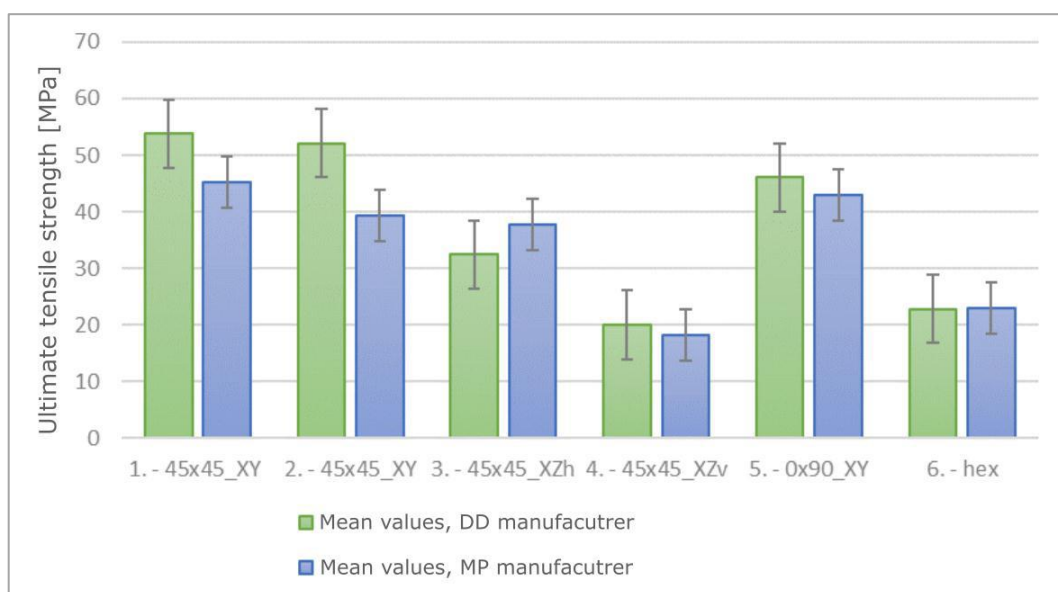
Obr. 5 Orientace výplně:  $0^\circ$  (nahore),

$90^\circ$  (uprostřed) a  $45^\circ$  (dole) [19]



Obr. 6 Výsledky tahové zkoušky pro různé orientace výplně [19]

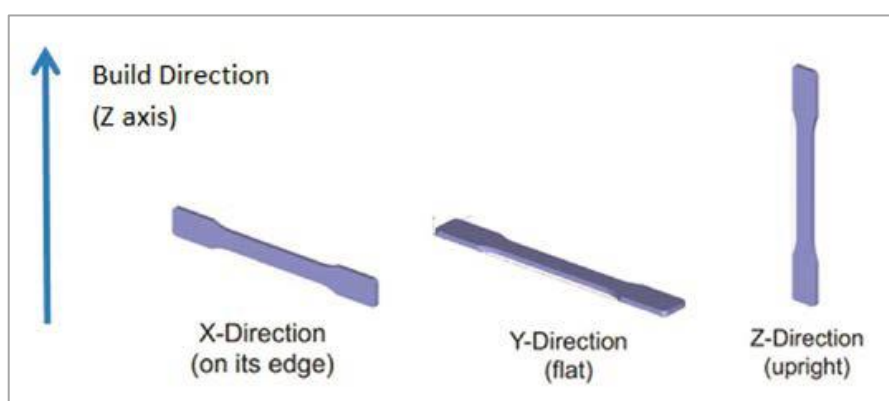
Krejbychová [20] se zaměřila na různé typy a orientace výplně a z jejích výsledků vychází stejné závěry jako Letchera [19].



Obr. 7 Porovnání mezi pevnostmi v závislosti na stylů výplně [21]

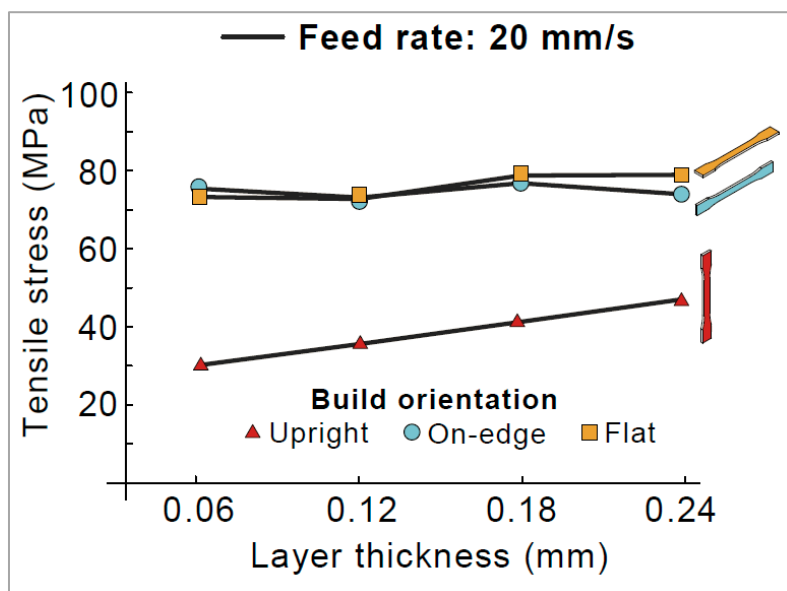
### 2.2.3 Orientace výtisku

“Orientace výtisku a styl výplně mají zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Při výrobě zkušebních vzorků je více způsobů, jak orientovat model na tiskové ploše. Základními pozicemi výtisku jsou: na hranu, na plochu či na výšku“ [21]. Model lze orientovat i pod různými úhly, natáčení modelů je výhodné zejména u složitých modelů, kde víme přesně jak se bude daný 3D objekt zatěžovat, jelikož náš testovaný vzorek je zjednodušeně zatěžované 2D těleso je zbytečné složitě natáčet daný model.



Obr. 8 Orientace zkušebních těles [22]

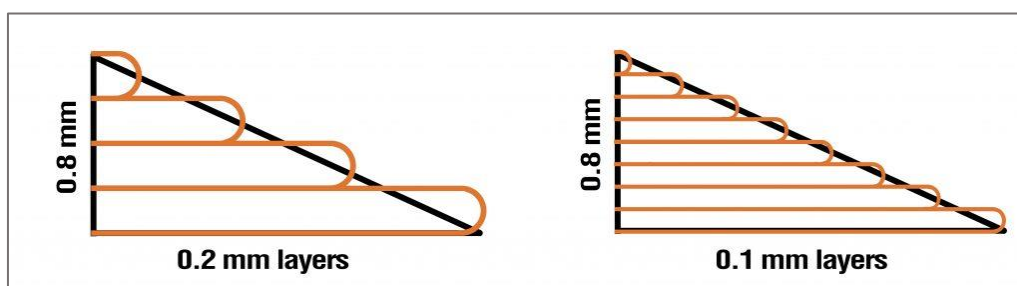
Problematikou orientace se zabýval Chacon et al.[m], který zjistil že mezi orientací na hranu a na plochu jsou minimální rozdíly. Výrazný rozdíl nastává při orientaci na výšku, kde je dosahovaná pevnost nižší o 50 až 70 %. Je to způsobeno zejména tím, že při orientaci na výšku nenamáháme jednotlivá vytisklá vlákna, ale namáháme spoj mezi jednotlivými vrstvami.



Obr. 9 Mez pevnosti v závislosti na orientaci výtisku a výšce vrstvy [14]

## 2.2.4 Výška vrstvy

Výška vrstvy je jedním z nejdůležitějších parametrů při tisku, tento parametr výrazně ovlivňuje kvalitu a výsledné mechanické vlastnosti modelu. Každý model se předtím než se vytiskne musí nejprve převést na formát který je schopný slicer zpracovat, ve sliceru následně generujeme data, která dáváme do tiskárny. Slicer při přípravě dat rozřeže celý model na vrstvy, po těchto jednotlivých vrstvách se následně model tiskne. Výškou vrstvy zásadně ovlivňujeme jak pevnostní charakteristiky, tak i rozlišení povrchu daného modelu. U všech konvenčních tiskáren co jsou na trhu jsou výšky vrstev od 50  $\mu\text{m}$  do 300  $\mu\text{m}$ . Další věc, kterou zásadně ovlivňuje výška vrstvy je tiskový čas.



Obr. 10 Rozdíl ve výškách vrstvy [23]

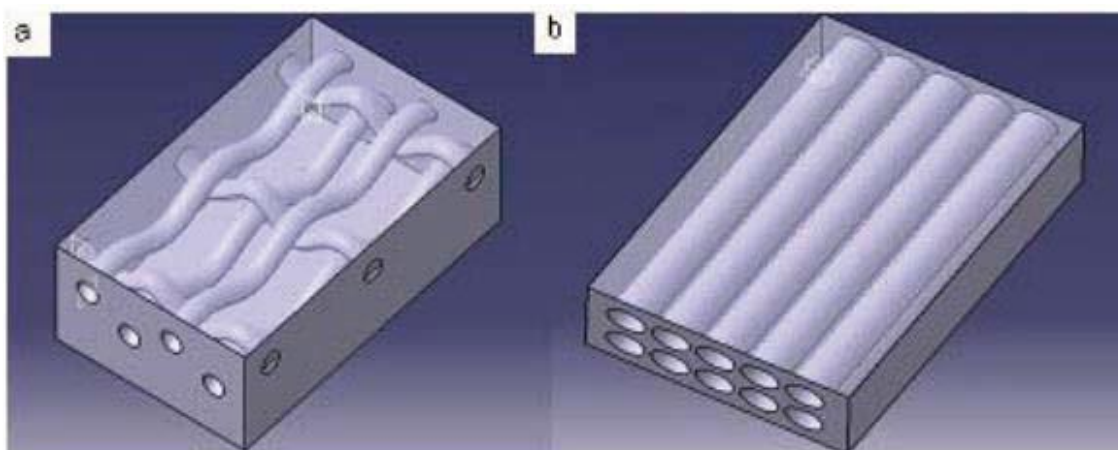


Výška vrstvy také ovlivňuje výslednou kvalitu tisku, čím lepší je kvalita povrchu tím hůře se na něm iniciují první trhliny (viz kapitola s vyhodnocením tahových zkoušek). Výška vrstvy dále ovlivňuje délku tisku. Další věc, co má vliv na výšku vrstvy je průměr trysky, to znamená čím menší je tryska tím déle tiskne. Standartem pro 3D tisk je tryska s průměrem 0,4 mm



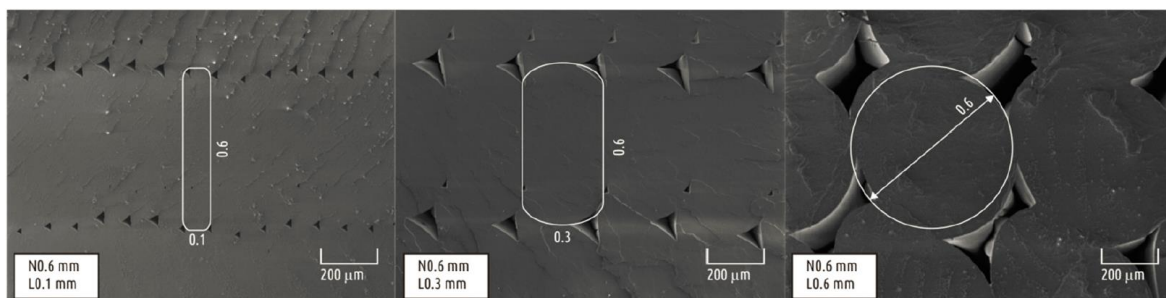
Obr. 11 Délka tiskového času při stejné výšce vrstvy ale při jiné [23]

Výška vrstvy nemá pouze estetický účel, ale zásadně ovlivňuje pevnost. Jak ukazuje Kuznetsov [24] a Stefan z CNC kitchen [16] se snižující se výškou vrstvy roste pevnost výtisku. Jiné práce zase ukazují opačný trend [25], a to že při výškách mezi 200  $\mu\text{m}$  300  $\mu\text{m}$  se dosahuje největší pevnosti [14]. Při vysokých výškách vrstvy vznikají větší vzduchové mezery mezi vrstvami, tyto vzduchové mezery způsobují že vzorek není dostatečně homogenní



Obr. 12 a) vrstvený kompozit s oboustranným uspořádáním vláken b) vrstvený jednosměrný kompozit [26]

Z toho nám plyne, čím je vrstva nižší, tím je objem vzduchových mezer menší a proto je homogenita materiálu větší a proto by měla být vyšší pevnost [24].



Obr. 13 Obrázek z SEM kde lze vidět velikost vzduchových mezer [24]

## 2.3 Použité technologie

### 2.3.1 Arburg Plastic freeforming (APF)

Jedná se o novou aditivní metodu. Na trh byla uvedena v roce 2013 německou plastikářskou firmou ARBURG. Technologie Arburg plastic freeforming (APF) se od FDM liší tím, že je založena na principu vstřikování drobných kapiček plastové taveniny pod vysokým tlakem, což zaručuje lepší homogenitu a odlišné uspořádání vláken oproti FDM technologii. Tato tiskárna je určena zejména pro firmy, které vyvíjejí a vyrábí komponenty ve velkých sériích metodou vstřikování plastů. Technologie je tedy vhodná pro tisk funkčních dílů nebo prototypů s vlastnostmi velmi blízkými reálně vyrobeným výrobkům, díky tomu se zkracuje vývojový čas pro daný díl. Další výhodou je, že funkční prototyp se zhotovuje z běžně používaného granulátu ze kterého se bude následně díl v sériově výrobě vyrábět [27].

Vstupním materiálem při tisku metodou APF je obyčejný granulát a ne filament, který se používá při tisku metodou FDM. Tím, že používáme obyčejný granulát nám klesají ceny za materiál a můžeme díl vytisknout i z materiálů, které nejsou u FDM tisku dostupné. U tisku touto metodou můžeme vytvořit i vícekomponentní díl, který se jinak musí tisknout z více částí. Mezi jednu z hlavních výhod patří vysoká kvalita a rozměrová stabilita tisku [28].

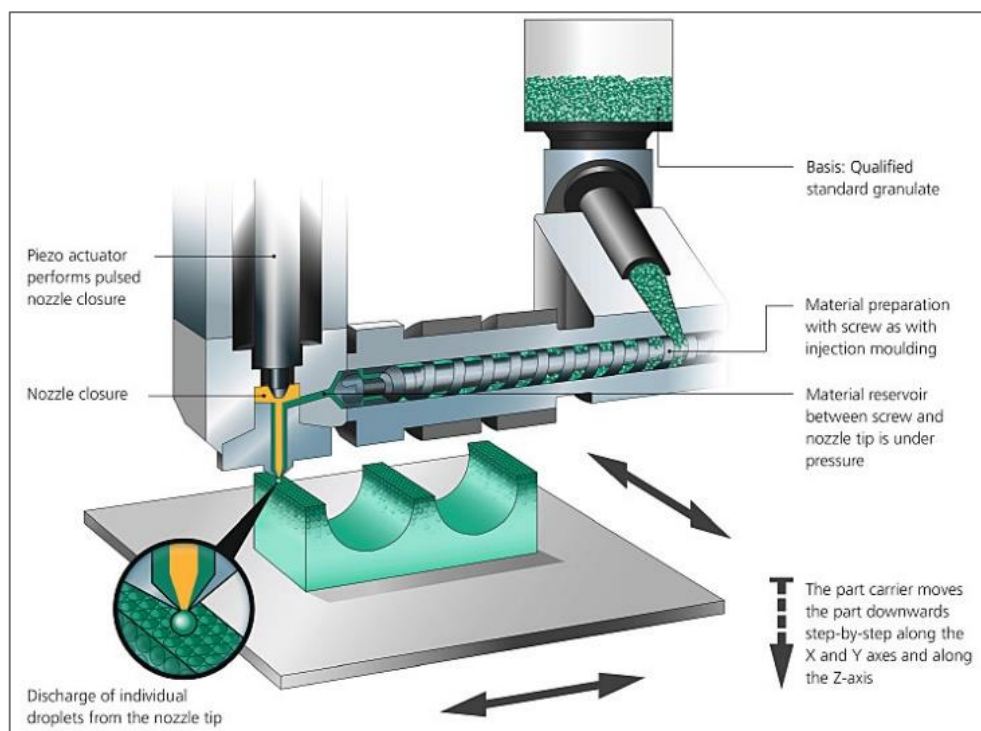
Přístroj Freeformer má volitelné průměry trysek od 0.15, 0.2 a 0.25 mm, lze tedy dosáhnout jak vysokého rozlišení modelu, tak hrubého rychlého konceptu, kde není kladen důraz na takovou povrchovou přesnost. Rozlišení v ose X a Y je díky použití lineárního motoru v toleranci cca 0.002 mm. Tisková plocha poskytuje prostor 230×130×250 mm a je vyhřívána uzavřeným vzduchovým okruhem až do 120 °C. Maximální teplota taveniny je až 350 °C. Samotná tavenina je vstřikována pod tlakem 500 - 1300 barů. Freeformer je vybaven dvěma tryskami pro tisk vymyvatelných podpor, nebo vícekomponentního tisku. Problémem nejsou ani pružné materiály v kombinaci s ABS nebo jiným termoplastem. Strukturou povrchu může výtisk z Freeformeru částečně připomínat výtisk z 3D tiskárny založené na sintrování plastového prášku, s tím rozdílem, že cena výtisku z Freeformeru je mnohonásobně nižší, kvůli ceně a dostupnosti vstupního materiálu.



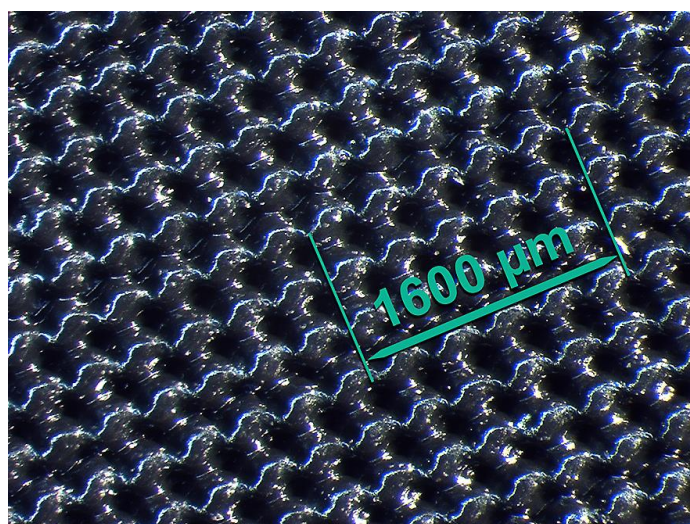
Díky použité technologii dosahují výtisky z Freeformeru 80 až 95 % pevnosti vstříkovaného dílce [29].

Princip tisku: Při tisku je granulát odebírán z násypky pomocí šneku. Poté je dopravován šnekem do tavičí komory, kde se pomalu taví. Po úplném roztavení je granulát promíchán šnekem, aby byla zaručena homogenita taveniny. Na konci šneku je malá komora, ve které je malá zásoba taveniny odtud je zásobována tryska. Tisk kapkami je umožněn tak, že tryska je uzavírána jehlou, která je ovládaná pomocí *piezo* krystalu. [27].

Hlavní výhodou této metody by měla být vysoká pevnost výtisku a nízká smrštitelnost modelu [27].



Obr. 14 Schéma principu stroje Arburg Freeformer [27]

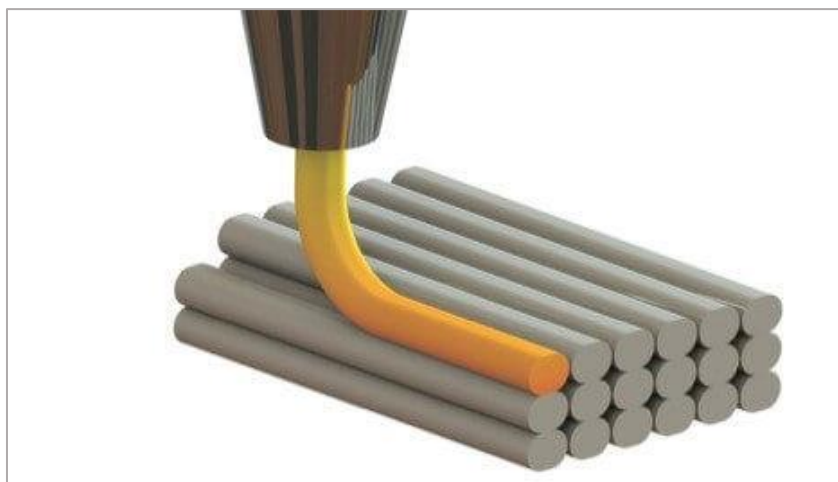


Obr. 15 Pohled na Freeformerem vytisklou vrstvu [30]

### 2.3.2 Fused Deposition Modelling (FDM)

Fused Deposition Modeling (FDM), je aditivní metoda, která vytváří objekt nanášením roztaveného materiálu po předem určené trajektorii, vrstvu po vrstvě. Jako materiál se používají termoplasty ve formě vlákna neboli filamentu. FDM je celosvětově nejpoužívanější metodou 3D tisku, a je nejčastější technologií se kterou se veřejnost může setkat [31].

Vstupním materiálem při tisku na FDM tiskárně je plastová struna, která se nazývá filament, tato struna je namotána na cívce. Cívky s filamentem mají nejčastěji hmotnost 1 kg. Filamenty se vyrábějí ve 2 různých průměrech, nejvíce rozšířený je průměr 1,75 mm, pro velkorozměrové tiskárny se používá průměr 2,85 mm. Podstata této technologie je v tavení plastové struny skrz rozeřátou trysku na stavební podložku. Výška nanášené vrstvy není stejná jako šířka vytlačovaného vlákna za tryskou, ale je dána tloušťkou trysky, ta obvykle bývá 0,4 mm. V případě složitějších tvarů výsledného objektu se používají podpurné struktury. Stavební i podpurný materiál jsou pomocí podavače dopravovány k tiskové hlavě. Tisková hlava obsahuje tavicí komoru, kde se materiál zahřívá a přes trysku je protlačován na stavební podložku. K protlačení materiálu slouží v tiskové hlavě pohon, který, tlačí materiál směrem k trysce pomocí otáčejících se ozubených kol. Na podložce okamžitě dochází ke ztuhnutí materiálu. Po nanesení jedné vrstvy se stavební podložka sníží o tloušťku této vrstvy. Po dokončení tisku se výsledný výrobek ze stavební podložky odlomí, podpora může být odstraněna mechanicky nebo pomocí chemické lázně a ultrazvuku pro odplavení. Každý materiál má rozdílné vlastnosti a rozdílné teploty tavení. 3D tiskárny se dělí na hobby tiskárny a průmyslové tiskárny [32].



Obr. 16 Princip FDM [33]

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

V dnešní době existuje mnoho metod 3D tisku založených na tisku Termoplastů, doposud zatím nikdo nezkoušel porovnat jednotlivé technologie mezi sebou navzájem a referenčním vstříkovaným dílem. Zkoumanými technologiemi 3D tisku budou metody FDM a APF, na toto nebyly nalezeny žádné publikace. Jako porovnávací faktory budou použity meze pevnosti jednotlivých materiálů. Problém je, že všichni výrobci udávají meze pevnosti pro standardizovaný vzorek, který je vyrobený metodou injekčního vstříkovaní a není vytisklý, takže se hodnoty pro daný materiál budou lišit. Problém je, že většina výrobců udává pevnost podle americké normy ASTM D882 [6] a jiní výrobci zase testují svoje materiály podle evropské normy ISO 527-2 [34]. Největší potíží je, že tyto metody jsou určeny pro zkoušení tenkých plastových folií, zatímco ještě nebyla vytvořena nová norma pro testování dílů vytisklých různými metodami 3D tisku [6] [34]. Nevýhoda používání těchto dvou norem je, že ASTM D882 je určená pro testování tenkých folií, oproti tomu norma ISO 527-2 je určená pro testování zkušebních těles o tloušťce 4 mm. Jedním z rozdílů u těchto dvou norem je jiná zatěžovací rychlost, ale liší se mnoha dalšími parametry.

Cílem této práce je navrhnout experiment a nezávisle porovnat dvě odlišné metody 3D tisku vůči referenčnímu vzorku u dvou odlišných polymerních materiálu. Materiál pro testování byl dodán výrobcem Fillamentum. Výběr materiálů byl uzpůsoben tak, aby se otestovali technické materiály z portfolia firmy Fillamentum. Zvolené materiály jsou CPE a ASA, tyto materiály se cenově pohybují od 770 Kč/Kg až po 1270 Kč/Kg [35].

CPE bylo zvoleno, protože tiskne stejně snadno jako PLA a jedná o materiál velmi podobný hojně používanému PET-G. Materiál ASA byl zvolen, protože se začíná používat místo dříve hojně používaného ABS. Dalším kritériem pro výběr těchto materiálu byl požadavek na to, aby materiál nedegradoval při tisku metodou APF.

Z důvodu omezení vlivu barvy na výsledné mechanické vlastnosti, jsme zvolili materiál v barvě Natural, což znamená že do základního polymeru nejsou přidána žádná barviva. Tento typ materiálu vychází vždy cenově nejlevněji, protože do ceny není zahrnuta cena pigmentu, další výhodou této varianty je, že výsledný výtisk bude mít o něco vyšší pevnost než kdyby byl v barevné variantě [36].

### 3.1 Cíle Práce

Experimentální stanovení vlivu použité technologie 3D tisku na výsledné mechanické vlastnosti daného zkušebního tělíska s porovnáním vůči tělísku, které má homogenní vlastnosti. Dále porovnat, jak vypadají lomové plochy a jaký mají vliv na mechanické vlastnosti.

Porovnání mechanických vlastností bude probíhat na polymerech CPE a ASA.

## Dílčí cíle bakalářské práce

- výběr polymerního filamentu
- návrh experimentů a testovacích vzorků
- výroba vzorků a provedení tahových zkoušek
- vyhodnocení a porovnání tahových vlastností testovaných vzorků

## 4 MATERIÁL A METODY

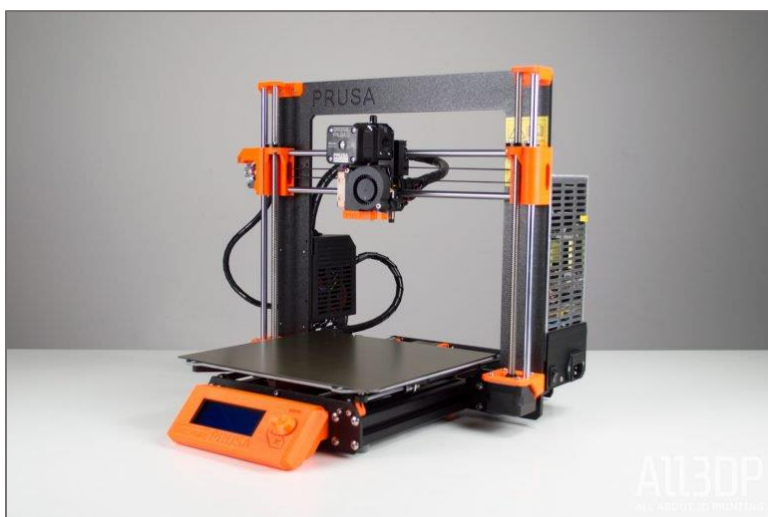
Za účelem zjištění procentuálních rozdílů mezi pevností mezi různými technologiemi 3D tisku a homogenním porovnávacím zkušebním tělesem bude vyrobeno 30 vzorků pro každý testovaný materiál, 20 vzorků bude vytisknutých technologií FDM, dalších 20 vzorků bude vyrobeno technologií APF a zbývajících 20 vzorků bude vyrobeno metodou vstřikování plastů, celkem bude vyrobeno 60 vzorků. Zkušební vzorky budou vyrobeny podle normy ISO 527-2. Všechny zkušební vzorky budou vyráběny tak, aby se dosáhlo co nejvyšších pevností. Všechny vzorky budou testovány za stejných podmínek, testy vzorků budou probíhat podle normy ISO 527-2 na trhací stroji Zwick Z020, který splňuje požadavky této normy. Následně budou získaná data statistiky zpracována za účelem zjištění mezi pevností pro jednotlivé tělíška, tyto získaná data budou mezi sebou porovnána a z výsledků porovnání budou stanoven závěr. Na základě získaných dat, se budou dále vyhodnocovat lomové plochy u jednotlivých zkoumaných metod.

### 4.1 Materiál

Pro testování byla vybrána barevná varianta Natural (bez přidaných pigmentů). Tato barva byla zvolena, protože pigmenty mají negativní vliv na výslednou pevnost [37]. Do experimentu byly vybrány 2 materiály společnosti Fillamentum, jedná se o materiály CPE a ASA. Tyto polymery byly vybrány kvůli dobré zpracovatelnosti na námi zkoumaných metodách. Pokud by byly k tisknutí vybrány materiály PVC nebo Polyamid, tak by byla větší pravděpodobnost výskytu problémů při tisku, protože PVC a Polyamid mají omezenou dobu zpracování a po jejím uplynutí materiál začne degradovat. Na tiskárně Arburg Freeformer vzniká problém, když je materiál dlouho na tavicí teplotě tak se znehodnocuje, to má za následek, že by výsledné vzorky neměli požadované mechanické vlastnosti, tento problém u metody FDM nevzniká, protože není zpracováváno tolik materiálu najednou.

### 4.2 Použité 3D tiskárny a nastavení tisku

Na výrobu vzorků byla použita 3D tiskárna **Průša i3 Mk3**. Stavební prostor tiskárny je 250 x 210 x 210 mm [38]. Díky velké tiskové ploše je možné tisknout více vzorků najednou. Z důvodu potřeby optimálních podmínek při tisku byly jednotlivé vzorky tištěny jednotlivě.



Obr. 17 3D tiskárna Průša i3 Mk3 [38]

Nastavení tisku bylo pro všechny vzorky stejné (rychlost posuvu, výška vrstvy, chlazení...). Teplota extrudéru byla zvolena pro CPE 275 °C a pro ASA 265 °C, zvolená teplota byla nastavena podle informací od výrobce [9] [6]. Teplota podložky byla nastavena na 95 °C (vyhřívání podložky zlepšuje přilnavost první vrstvy a zpomaluje chlazení výtisku). Výška první vrstvy byla zvolena 165 μm, výška ostatních vrstev byla zvolena 150 μm (nastavení bylo zvoleno tak, abychom měli podobnou výšku vrstvy jako u metody APF). Přestože se nejvyšších pevností se dosahuje při výšce vrstvy 0.100 μm, zvolená výška byla 150 μm, kvůli tomu aby u obou metod byla stejná výška vrstev [24] [19]. Rychlost tisku byla zvolena na 40 mm/s, protože při této rychlosti se dosahuje nejlepšího spojení jednotlivých vrstev. Všechny výtisky byly orientované na plochu v rovině XY [39] [20] tj. položené největší plochou na podložku. Při této orientaci se dosahuje nejlepších pevnostních parametrů viz kapitola 2.2.3.

tab. 4 Použité nastavení pro tisk ASA a CPE

<i>Parametry</i>	<i>Hodnoty</i>
<b>Teplota trysky</b>	265 °C (ASA), 275 °C (CPE)
<b>Teplota podložky</b>	95 °C
<b>Výška vrstvy</b>	První vrstva 165 μm , ostatní vrstvy 150 μm
<b>Rychlost tisku</b>	40 mm/s
<b>Extrusion ratio</b>	100 %
<b>Počet perimetrů</b>	4
<b>Vnitřní výplň (infill)</b>	100 %
<b>Vzor výplně</b>	Šrafování pod úhlem 45° (Rectilinear)
<b>Průměr trysky</b>	0,4 mm
<b>Chladicí ventilátor</b>	vypnutý



Na výrobu 2 série vzorků byla použita tiskárna **Arburg Freeformer** s velikostí tiskového prostoru 189 x 134 x 230 mm [28]. Díky velké tiskové ploše byly vzorky tisknuté po 5 kusech najednou. Nastavení pro tisk CPE bylo 250 °C a pro ASA 240 a 235 °C, teplota pro tisk, byla zvolena podle materiálového listu dodaného společností Fillamentum. Teplota komory a podložky byla 90 °C, vyhřívání podložka zlepšuje přilnavost první vrstvy a zpomaluje chladnutí výtisku). Výška první vrstvy byla zvolená 200 μm. Výška všech ostatních vrstev byla pak zvolena na 200 μm. Rychlost tisku byla zvolena na 65 mm/s, protože toto jsou standartní parametry pro tisk na tomto stroji. Všechny výtisky byly orientovány na rovině XY [39] [20] tj. položené největší plochou na podložku. Při této orientaci se dosahuje nejlepších pevnostních parametrů viz kapitola 2.2.3

**Tab. 5** Použité nastavení pro tisk ASA a CPE

<i>Parametry</i>	<i>Hodnoty</i>
Teplota trysky	240 - 235 °C (ASA), 250 °C (CPE)
Teplota komory	90 °C
Výška vrstvy	První vrstva 200 μm , ostatní vrstvy 200 μm
Rychlost tisku	
Feed rate rapid	250mm/s
feed rate countinuous extrussion	65mm/s
feed rate descrete extrusion	20mm/s
Extrusion ratio	není
Počet perimetrů	1
Vnitřní výplň (infill)	100%
Vzor výplně	Šrafování pod úhlem 45° (Rectilinear) (45/90)
Průměr trysky	0,2 mm
Chladicí ventilátor	není

The screenshot shows a software interface with the following settings:

- Feed rate rapid: 250 mm/s
- Feed rate continuous extrusion: 65 mm/s
- Feed rate discrete extrusion: 20 mm/s
- Drop aspect ratio: 1.2850
- Build parameters**
  - Sorting: Begin with contour
  - Transition thickness: 2.0000 mm
  - Self-supporting angle: 75.0000 °
- Border contours**
  - Activate border contours:
  - Number of border contours: 1
  - Outer compensation factor: 0.0000
  - Inner compensation factor: 0.0000
  - Start point relocation: 10.0000 mm
  - Sorting: Inside out
- Area filling**
  - Activate area filling:
  - Overlap with border contour: 50.0000 %
  - Start angle: 45.0000 °
  - Increment angle: 90.0000 °
  - Filling degree: 100.0000 %
- Support gap merging:  (collapsed)
- Auto-support parameters: (collapsed)

**Obr. 18** Další parametry tisku

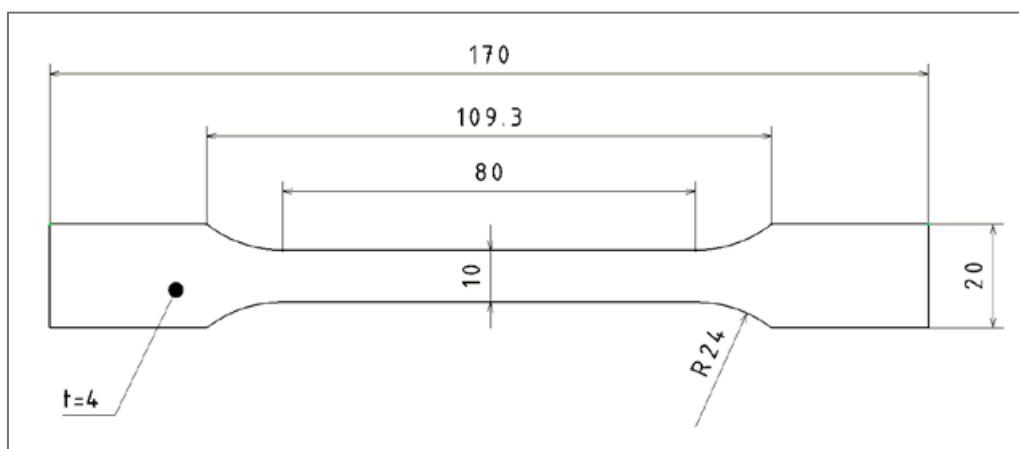


Obr. 19 Arburg Freeformer [28]

### 4.3 Metodika testování a vyhodnocení

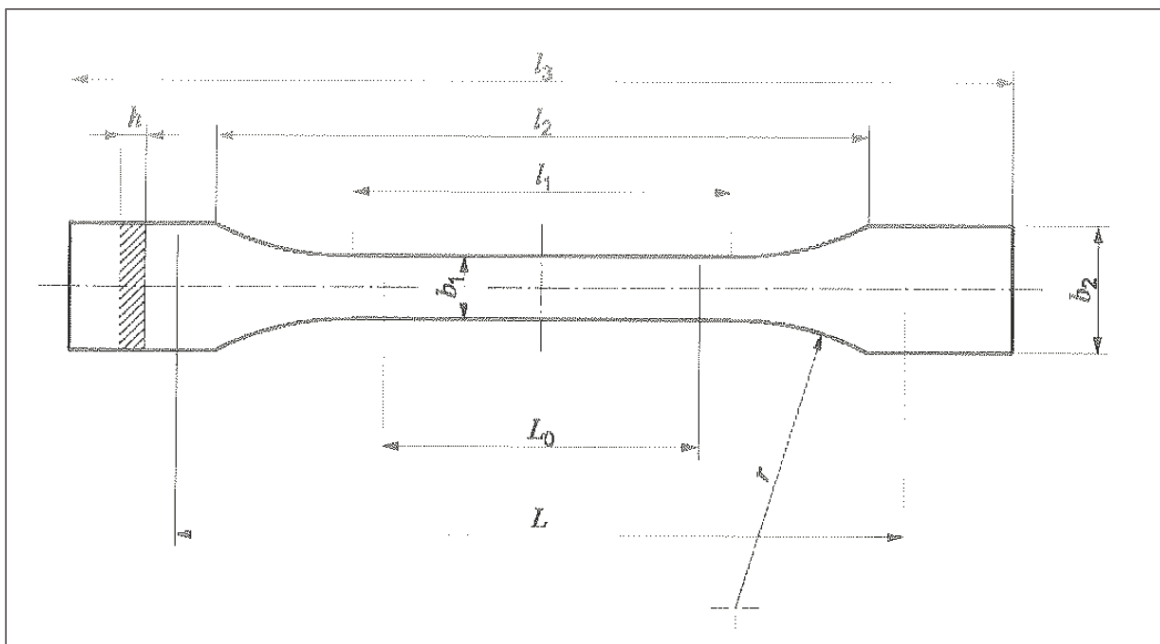
Pro tento experiment byla zvolena norma ISO 527-2, je to norma pro stanovení mechanických vlastností pro tvárné a vytlačované plasty, podle této normy byly zhotovené vzorky 3D tiskem.

Aby bylo možné statisticky vyhodnotit výsledky tahové zkoušky, tak je normou stanovený minimální počet 5 zkušebních vzorků. Tvar a rozměry zkušebního tělesa pro vstříkovaná tělesa jsou stanoveny normou ISO 527-2 [40]. Zkušební tělesa podle těchto dvou norem mají stejný příčný průřez viz obr. dole



Obr. 20 Zkušební těleso 1A dle normy ISO 527-2 [40]





Obr. 21 Zkušební těleso 1B dle normy ISO 527-2 [40]

Rozměry v milimetrech

Typ zkušebního tělesa		1A	1B
$l_3$	Celková délka <sup>a</sup>	170	$\geq 150$
$l_1$	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$80 \pm 2$	$60,0 \pm 0,5$
$r$	Poloměr	$24 \pm 1$	$60 \pm 0,5$
$l_2$	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami <sup>b</sup>	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
$b_2$	Šířka konců	$20,0 \pm 0,2$	
$b_1$	Šířka zúžené části	$10,0 \pm 0,2$	
$h$	Doporučená tloušťka	$4,0 \pm 0,2$	
$L_0$	Počáteční měřená délka (preferovaná)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Počáteční měřená délka (přípustná, jestliže se požaduje pro řízení kvality nebo když je předepsána)	$50,0 \pm 0,5$	
$L$	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$115 \pm 1$	$115 \pm 1$

<sup>a</sup> Doporučená celková délka 170 mm pro typ 1A je v souladu s ISO 294-1 a ISO 10724-1. U některých materiálů smí být délka lopatek prodloužena (např.  $l_3 = 200$  mm), aby se zabránilo porušení nebo prokluzování tělesa v upínacích čelistech zkušebního stroje.

<sup>b</sup>  $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$ , pro  $l_1$ ,  $r$ ,  $b_1$  a  $b_2$ , musí však být v určených mezích.

Obr. 22 Rozměry zkušebního tělesa dle normy ISO 527-2 [40]

Norma ISO 294-1 určuje, že z výsledků bude stanoven interval spolehlivosti s 95% pravděpodobností podle normy ISO 2602. Je uvažováno normální (Gaussovo) rozdělení, kde jsou parametry, průměr a směrodatná odchylka jsou neznámé. Rozdělení výsledků získaných při zkušebních podmínkách je všeobecně považováno jako normální rozdělení, nebo rozdělení blízké normálnímu rozdělení. Výsledkem tohoto statistického zpracování jsou intervaly meze pevnosti a modulu pružnosti pro každou metodu a materiál.

### 4.3.1 Definice meze pevnosti $\sigma_m$

$\sigma_m$  je napětí při prvním lokálním maximu zpozorovaném v průběhu tahové zkoušky. Je to hranice maximální pevnosti daného materiálu. Po překročení této hodnoty dochází ke vzniku krčku (viz kapitola 4.3.2) a při pokračujícím zatěžování dochází k lomu [40].

$$\sigma_m = F_m/S$$

kde platí

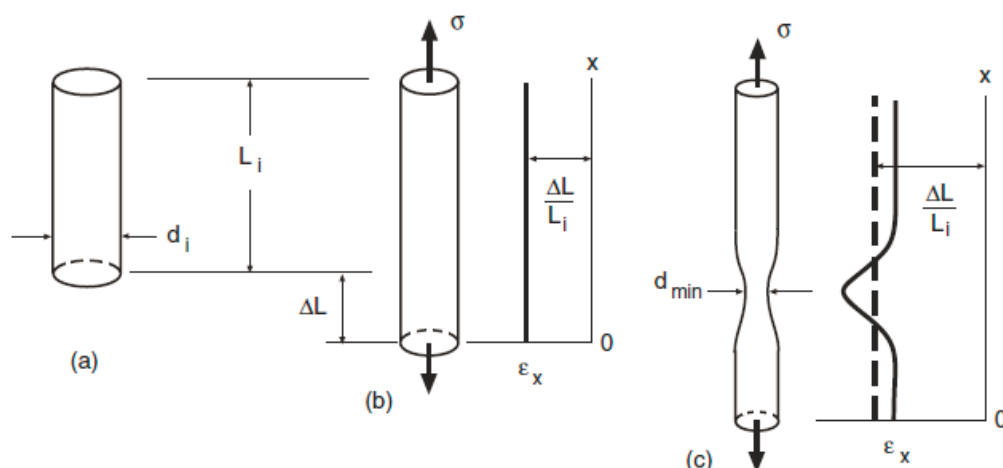
$\sigma_m$  je hodnota meze pevnosti, vyjádřená v megapascálech [MPa]

$F_m$  je maximální naměřená síla, vyjádřená v newtonech [N]

$S$  je počáteční průřez zkušebního tělesa, vyjádřených v milimetrech čtverečních [ $mm^2$ ]

### 4.3.2 Tvorba krčku

Při tahové zkoušce se u tvárných materiálů objevuje jev, který se nazývá krček. Deformace u vzorku je z počátku rovnoměrná, ale později se začne soustředit do jedné oblasti (do oblasti s defektem). To vede k tomu, že se v této oblasti zmenšuje průměr více než v jiných částech vzorku. U tvárných kovů se začíná tvořit hrdlo v bodě maximální síly (maximálního napětí), po překročení tohoto bodu začne síla rapidně klesat. Jakmile se krček začne tvořit, přestávají platit zákony lineární napjatosti, ale zákony trojrozměrné napjatosti. U tahové zkoušky z polymerních materiálů může být krček nevýrazný [41].



**Obr. 23** Deformace při tahové zkoušce tvárného materiálu a) nezatížený vzorek b) při rovnoměrném prodlužování c) při zužování (tvorba krčku) [41].

### 4.3.3 Příprava na testování

Po výrobě všech vzorků, byly všechny vzorky změřeny zváženy a označeny, kvůli následné jednodušší identifikaci po zkoušce tahem.

### 4.3.4 Tahová zkouška

Měření proběhlo na stroji Zwick Z020, který splňuje požadavky normy ISO 527-2. Maximální tahová síla, kterou tento stroj dokáže vyvinout je 20 kN.



Obr. 24 Foto stroje Zwick Z020

V průběhu tahové zkoušky bylo zaznamenáváno prodloužení zkušebních těles v závislosti na zatěžující síle. Z těchto záznamů byly následně sestrojeny tahové křivky jednotlivých pro názorné porovnání průběhu tahové zkoušky (viz kapitola 6). Výstupní data z tahové zkoušky byla zaznamenána v protokolu, ve kterém byla napsána mez pevnosti, maximální zatěžující síla a modul pružnosti pro každé těleso (viz kapitola 5.1.3).

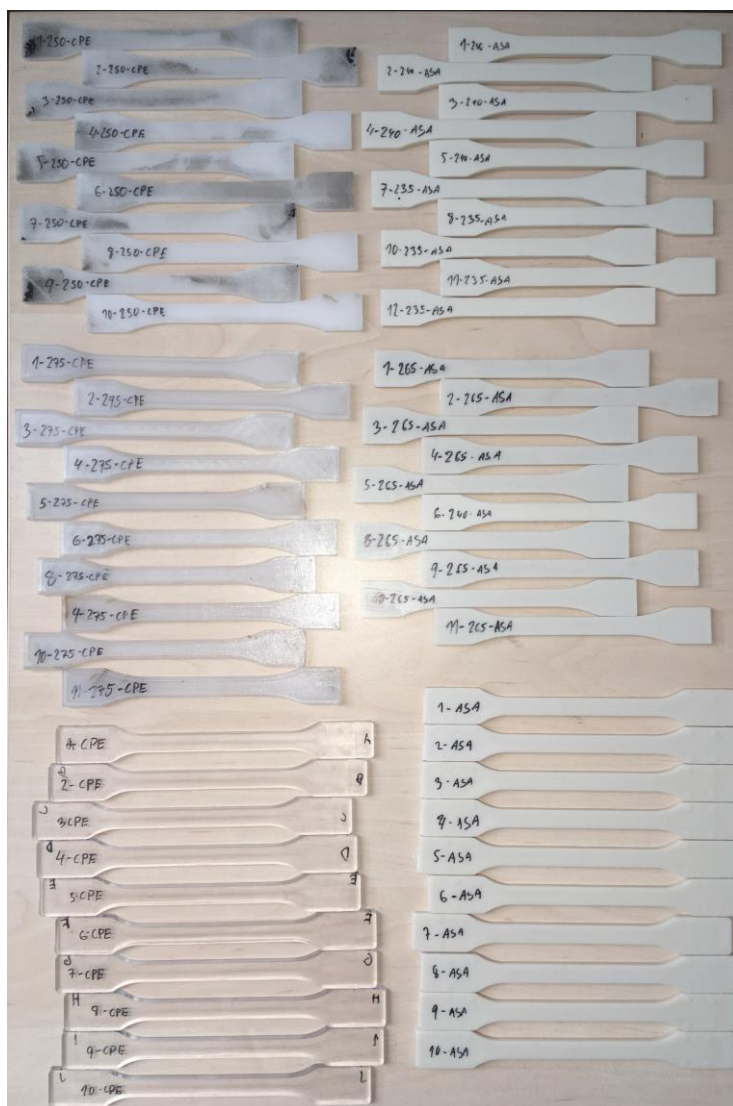
Na základě informačních materiálů o metodě APF je předpoklad, že nejvyšší pevnost v tahu bude mít vzorek vyrobený injekčním vstřikováním plastů. Druhou nejvyšší pevnost by měli mít vzorky vyrobené metodou APF a nejnižší pevnost by měli mít vzorky vyrobené metodou FDM [42].

# 5 VÝSLEDKY

## 5.1 Výsledky tahové zkoušky

Celkem bylo otestováno a vyhodnoceno 52 zkušebních těles, 26 vzorků pro materiál ASA a 26 vzorků pro materiál CPE. Zkušební vzorky pro každý materiál byly vyrobené třemi různými technologiemi, první dvě technologie byly FDM a APF, třetí byla konvenčně známá technologie vstřikování plastů. Takto vyrobené vzorky sloužily jako referenční vzorky vůči kterým porovnááme technologie FDM a APF.

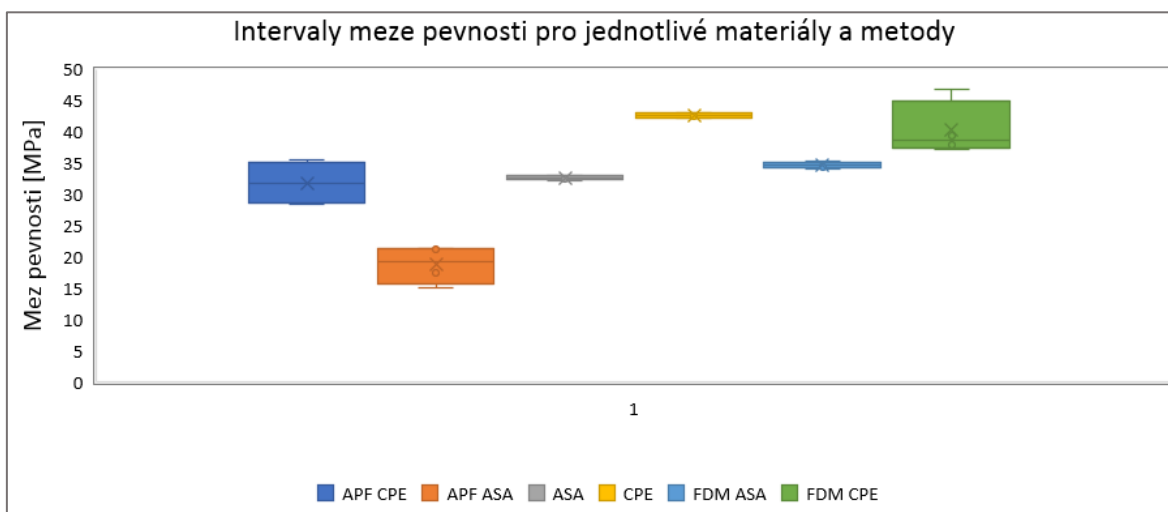
Na základě dat získaných z tahové zkoušky jsme zjistili mez pevnosti pro každé zkušební těleso. Tyto data byla následně statisticky zpracována, a pro každou sérii vzorků byly sestaveny intervaly meze pevnosti a modulu pružnosti pro každou technologii a polymerní materiál.



Obr. 25 Zkušební tělesa před testováním

### 5.1.1 Mez pevnosti $\sigma_m$

Zpracování všech naměřených dat proběhlo v programu Microsoft Excel. Výstupem z analýzy dat byl interval meze pevnosti s 95 % pravděpodobností. Pro názornější porovnání byla data vynesena do grafu (Obr. 23)



Obr. 26 Grafické znázornění získaných dat s intervalem pro mez pevnosti

### 5.1.2 Porovnání jednotlivých metod mezi sebou

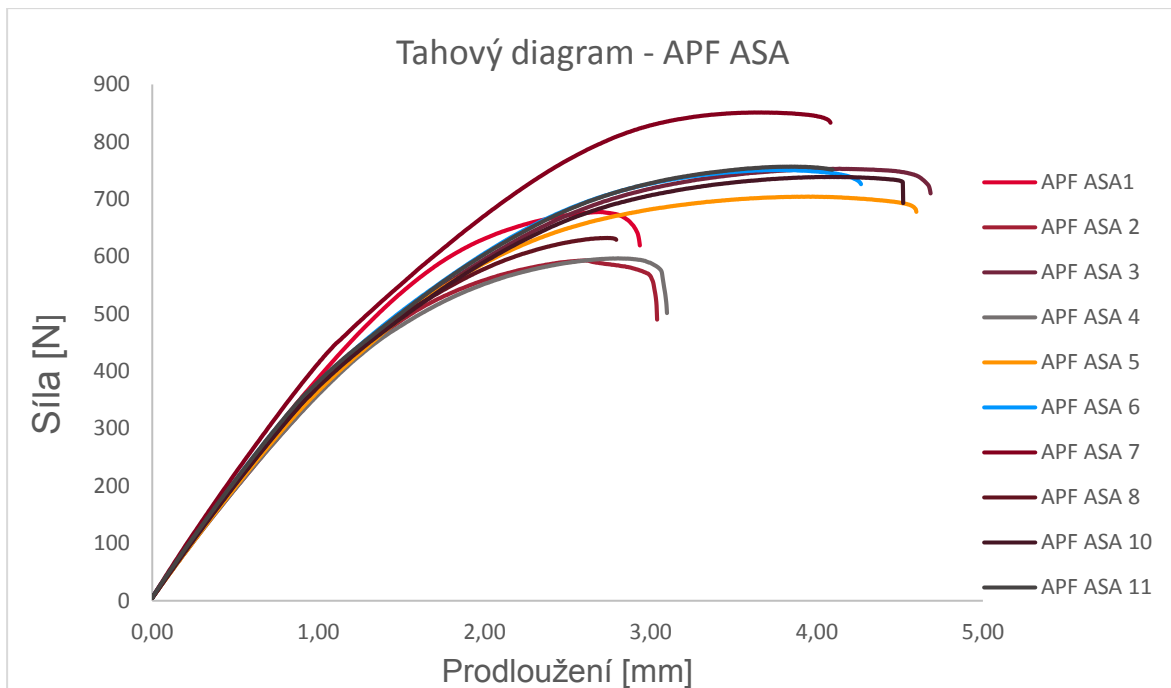
Po zpracování naměřených

tab. 6 Porovnání jednotlivých vzorků

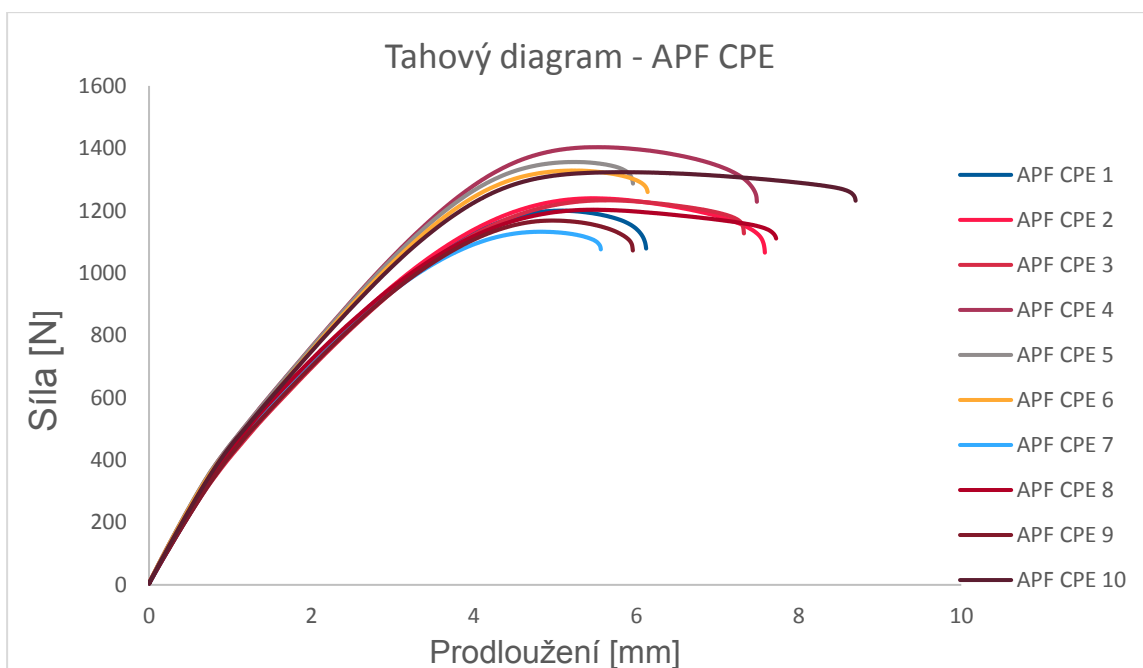
Typy metod vzorků	$\sigma_m$ [MPa]	% pevnost	hmotnost vzorku [g]
APF ASA	$19,31 \pm 1,99$	61,37	7,2
APF CPE	$31,61 \pm 2,16$	74,07	9,0
ASA	$31,47 \pm 0,23$	100,00	10,3
CPE	$42,68 \pm 0,299$	100,00	12,1
FDM ASA	$34,67 \pm 0,35$	110,19	8,4
FDM CPE	$42,56 \pm 3,18$	99,72	9,8

### 5.1.3 Tahové diagramy pro jednotlivé metody a materiály

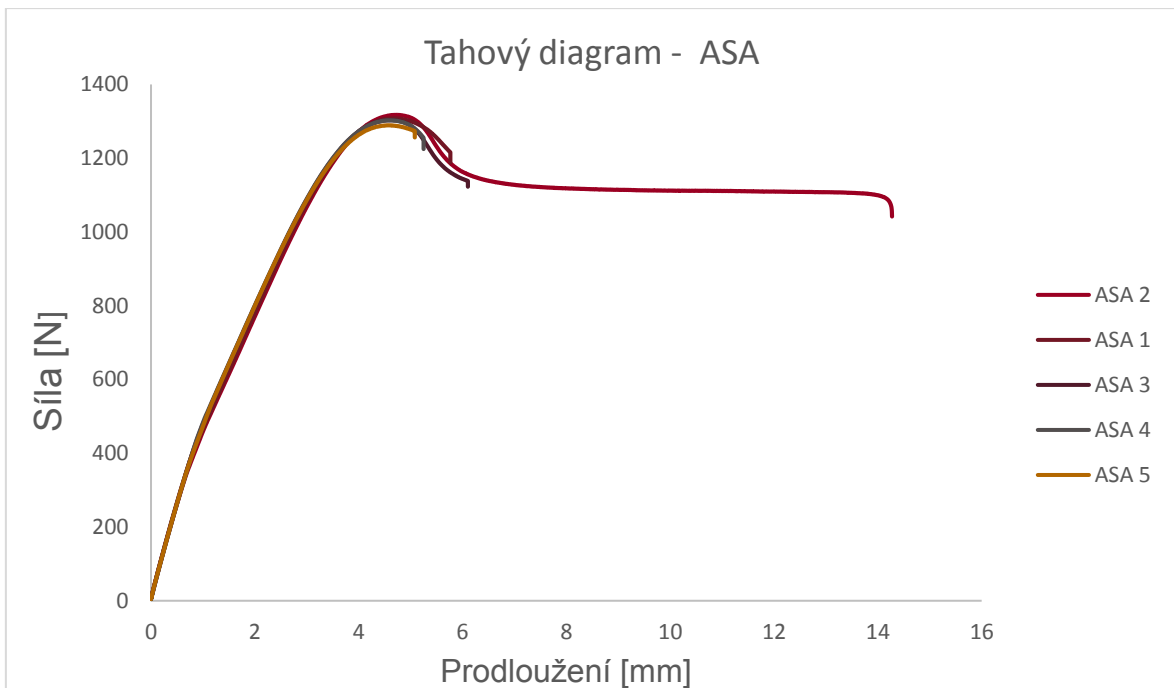
Z tahových diagramů lze vypožorovat, že se všechny vzorky pro stejnou metodu chovali velmi podobně. Z Obr. 25 a 26 nám vychází, že u této metody se vzorek protáhne méně než u ostatních metod, to je způsobeno podstatou této metody. Dále nám z tahových diagramů vychází že materiál CPE je houževnatější než ASA (vzorky se protáhnou více než u ASA). Dále z tahových diagramů můžeme vyčíst, že u CPE vznikne větší krček než u ASA.



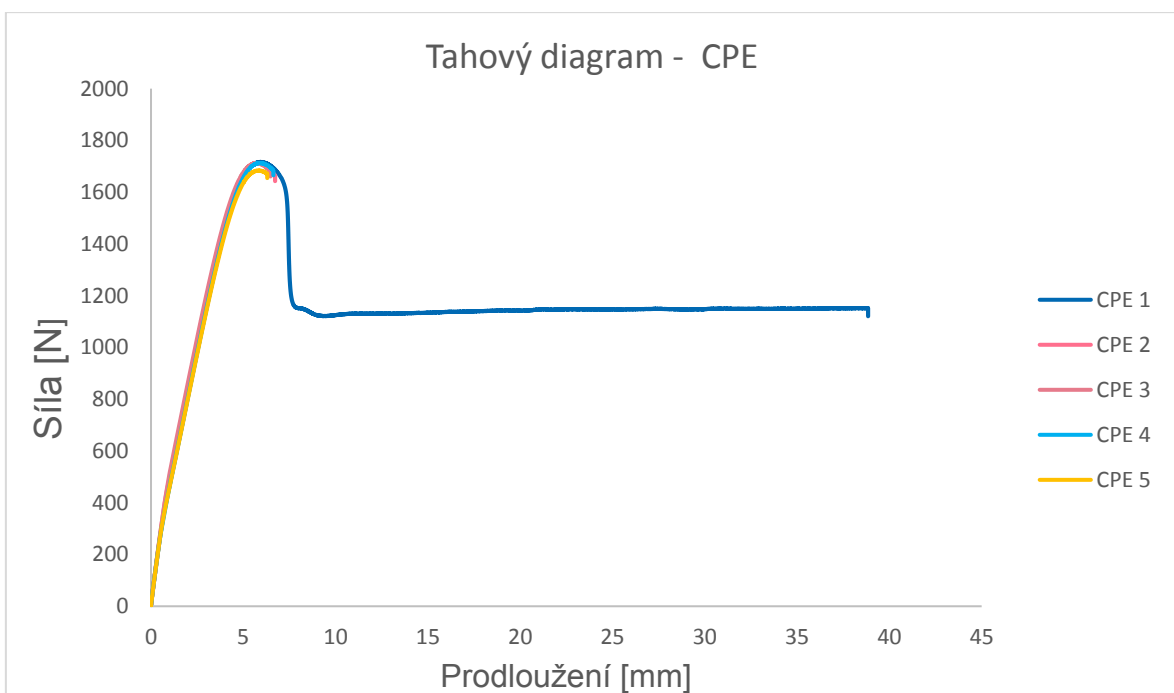
Obr. 27 Tahové křivky pro vzorky vyrobené na stroji Arburg Freeformer, materiál ASA



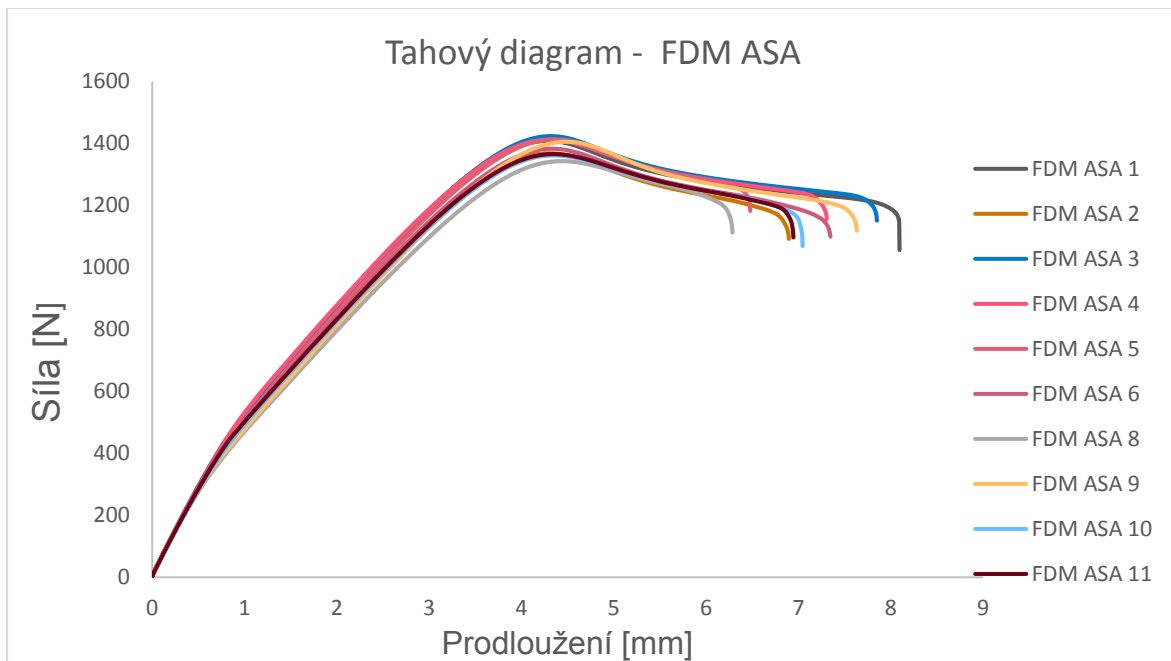
Obr. 28 Tahové křivky pro vzorky vyrobené na stroji Arburg Freeformer, Materiál CPE



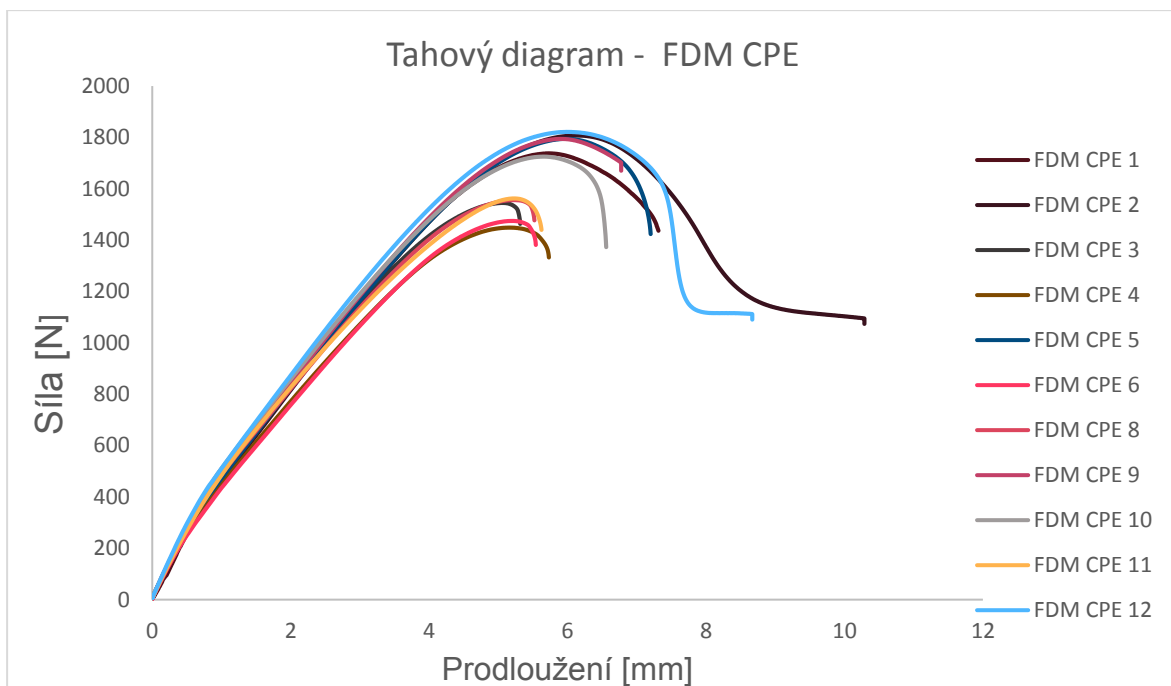
Obr. 29 Tahové křivky pro vzorek vyrobený injekčním vstřikováním plastů, Materiál ASA



Obr. 30 Tahové křivky pro vzorek vyrobený vstřikováním plastů, Materiál CPE



Obr. 31 Tahové křivky pro vzorek vyrobený na tiskárně Prusa i3 Mk3, Materiál ASA

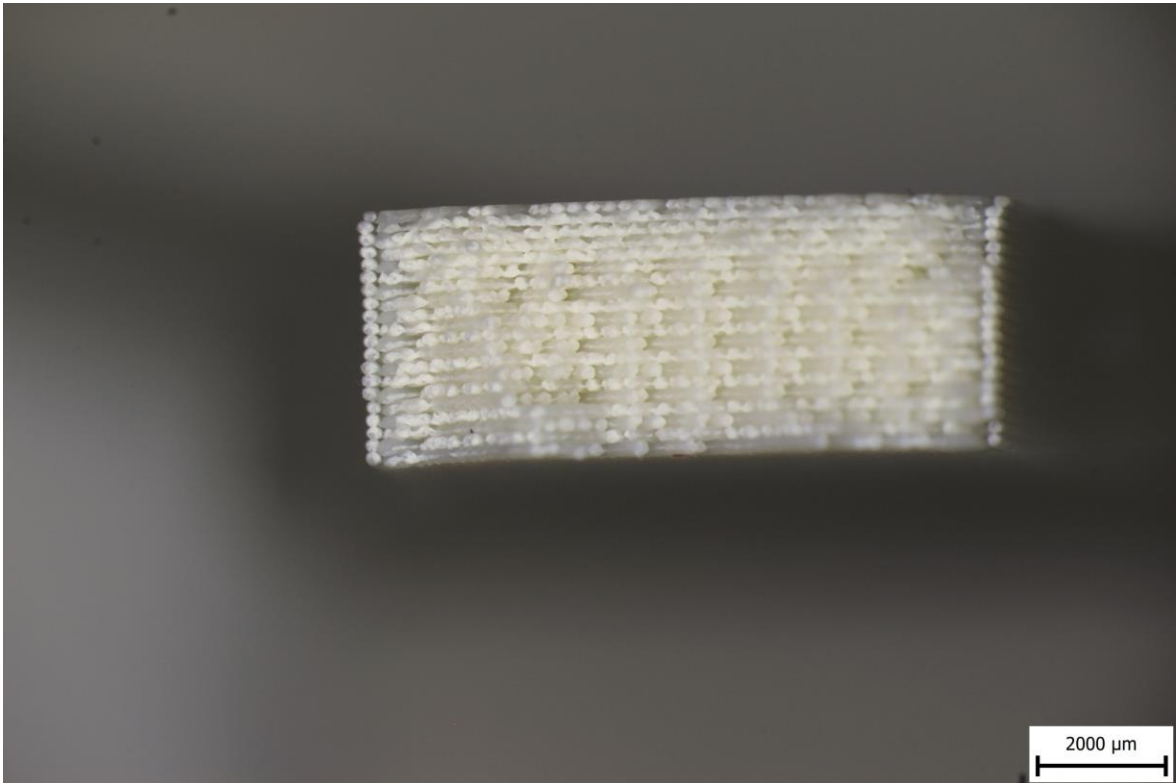


Obr 32 Tahové křivky pro vzorek vyrobený na tiskárně Prusa i3 Mk3, Materiál CPE

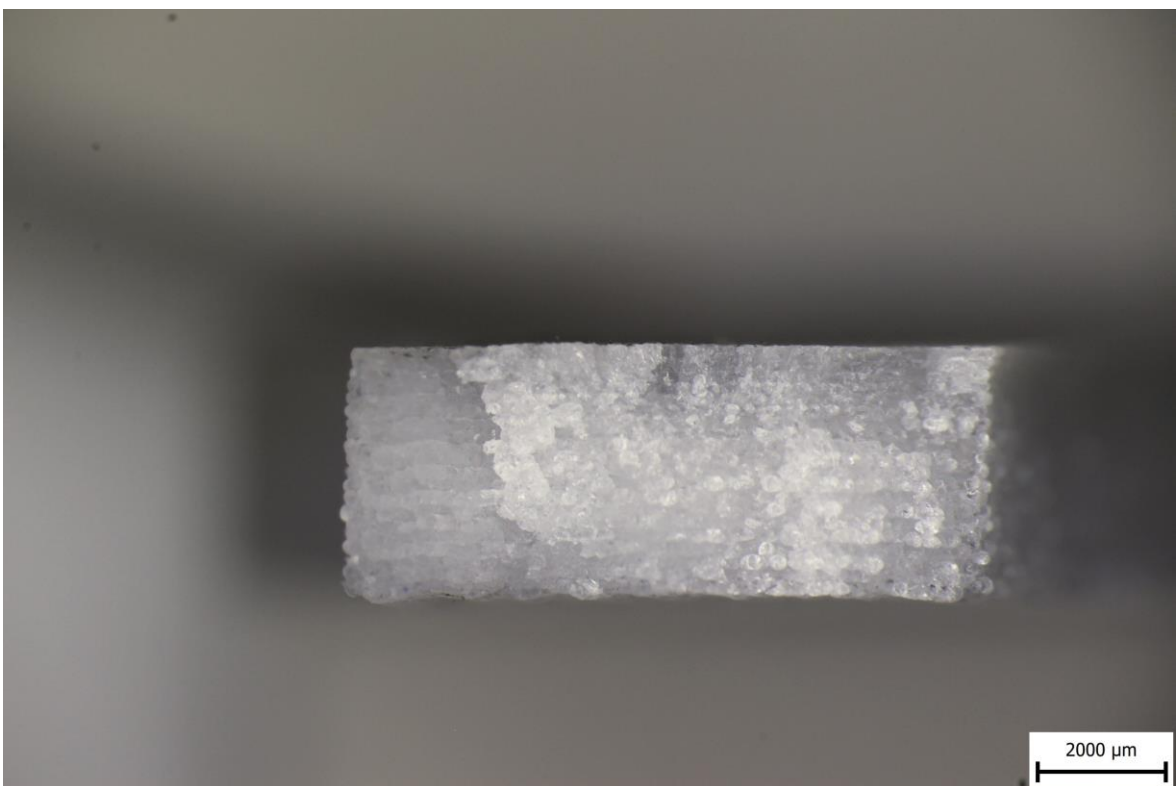
### 5.1.4 Pohled na lomové plochy

Po tahové zkoušce byly nafoceny lomové plochy, za účelem vyhodnocení, jaká je vnitřní struktura u jednotlivých metod. U metody APF jsou vidět jednotlivé kapičky a mezi kapičkami vzduchové mezery (tzv. póry). U metody vstřikování plastů jde vidět, že celý vzorek je homogenní. U vzorku z metody FDM jdou vidět malé dutiny.

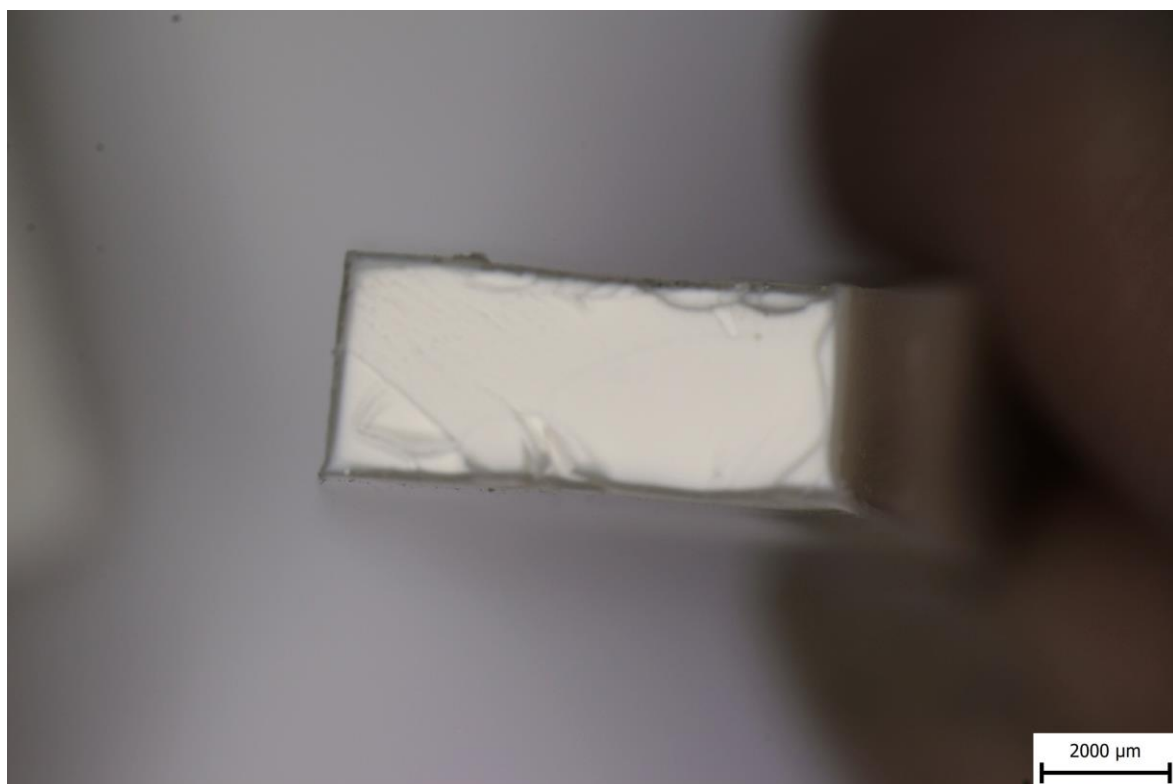




Obr. 33 Lomová plocha u vzorku vyrobeného metódou APF, materiál ASA



Obr. 34 Lomová plocha u vzorku vyrobeného metódou APF, materiál CPE



**Obr. 35** Lomová plocha u vzorku vyrobeného metódou injekčného vstřikování plastů, materiál ASA



**Obr. 36** Lomová plocha u vzorku vyrobeného metódou injekčného vstřikování plastů, materiál CPE



**Obr. 37** Lomová plocha u vzorku vyrobeného metódou FDM, materiál ASA



**Obr. 38** Lomová plocha u vzorku vyrobeného metódou FDM, materiál CPE

## 6 DISKUZE

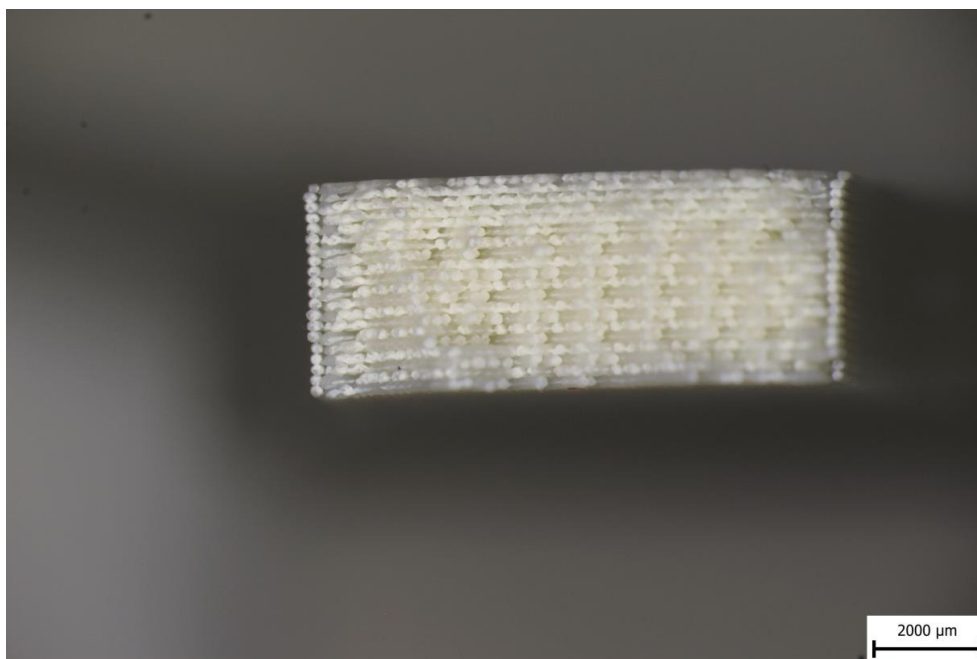
V této práci byla ověřována hypotéza, že mechanické vlastnosti zkušební tělíska vyrobené metodou APF budou lepší než u metody FDM. Pro ověření této hypotézy byl navržen experiment kde se porovnají 2 polymerní materiály na těchto dvou metodách, abychom mohli porovnat tyto dvě metody, tak byly ještě vyrobeny ověřovací vzorky, které byly vyrobeny metodou injekčního vstřikování plastu. Za účelem ověření této hypotézy, byly firmou Fillamentum dodány dva materiály, ze kterého byly vytvořeny všechny vzorky. Při výrobě vzorků bylo ohlédáno, že materiál ze kterého jsou všechny vzorky jsou ze stejné šarže. Pro testování parametru byla vybrána zkouška tahem, pro zkoušku byly vybrány vzorky podle normy ISO 527-2 1A a 1B, vzorky 1A byly navstříkovány a vzorky 1B byly vytisknuté, vzorky 1B byly zvolené proto, že stavební prostor u Freeformeru je omezen a vejde se do něj tento vzorek. Pro experiment bylo vyrobeno celkem 86 vzorků. 23 vzorků navstříkovaných, 25 vzorků pro metodu APF a 38 vzorků metodou FDM. Před tahovými zkouškami byly vybrány nejkvalitnější vzorky bez vad, které byly následně přeměřeny a zváženy pro následné vyhodnocení na konci tahových zkoušek. Během tahových zkoušek bylo nakonec natrháno 52 vzorků. Po provedeníh tahových zkoušek jsme zjistili, že vzorky ze stejné technologie se u stejného materiálu chovají velmi podobně. Dále se nepotvrdila hypotéza, kterou jsme na začátku předpokládali. Z experimentu vyšlo, že nejvyšší pevnosti se dosáhlo u vzorku z FDM technologie pro materiál CPE a naopak nejnižší pevnosti se dosáhlo u technologie APF. Dále bylo zjištěno, že pevnost dílu z Freeformeru je přibližně o 30 % menší, než je pevnost homogenního dílu. Při porovnání FDM a homogenního dílu se pevnost liší do 10 % (tab. 5).

Ze zjištěných výsledků vyplývá že tělíska z metody APF jsou při porovnání vůči ostatním tělískům nejlépe to má vliv na výslednou pevnost. Bohužel nelze přímo porovnat vstříkovaný díl a tisklé tělíska, protože je zkušební těleso je delší o 20 mm, naštěstí příčný průřez zkoumané části je stejný, takže to nemá vliv na mez pevnosti.

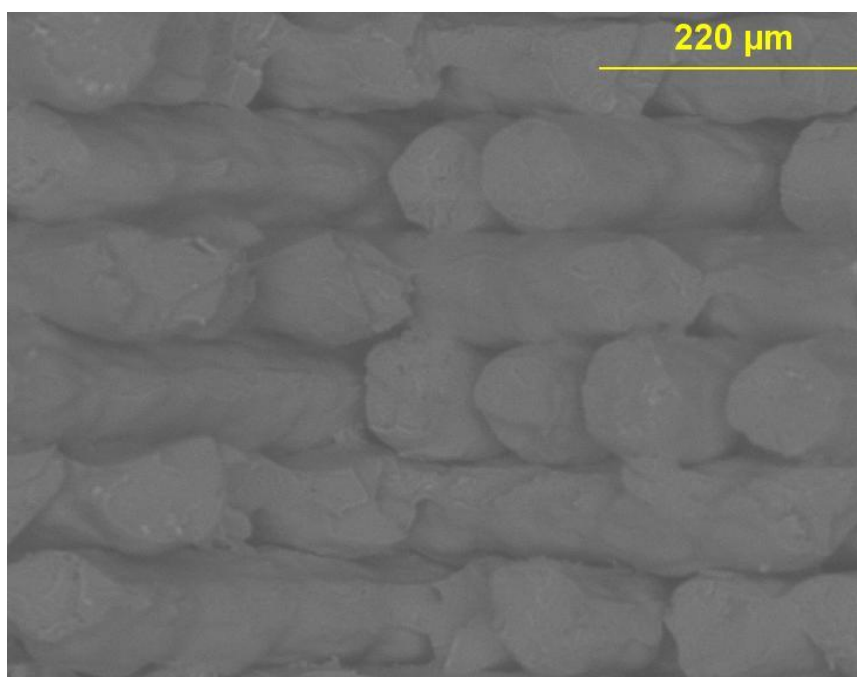
tab. 7 Porovnání jednotlivých vzorků

Typy metod vzorků	$\sigma_m$ [MPa]	% pevnost	hmotnost vzorku [g]
APF ASA	19,31 ± 1,99	61,37	7,2
APF CPE	31,61 ± 2,16	74,07	9,0
ASA	31,47 ± 0,23	100,00	10,3
CPE	42,68 ± 0,299	100,00	12,1
FDM ASA	34,67 ± 0,35	110,19	8,4
FDM CPE	42,56 ± 3,18	99,72	9,8

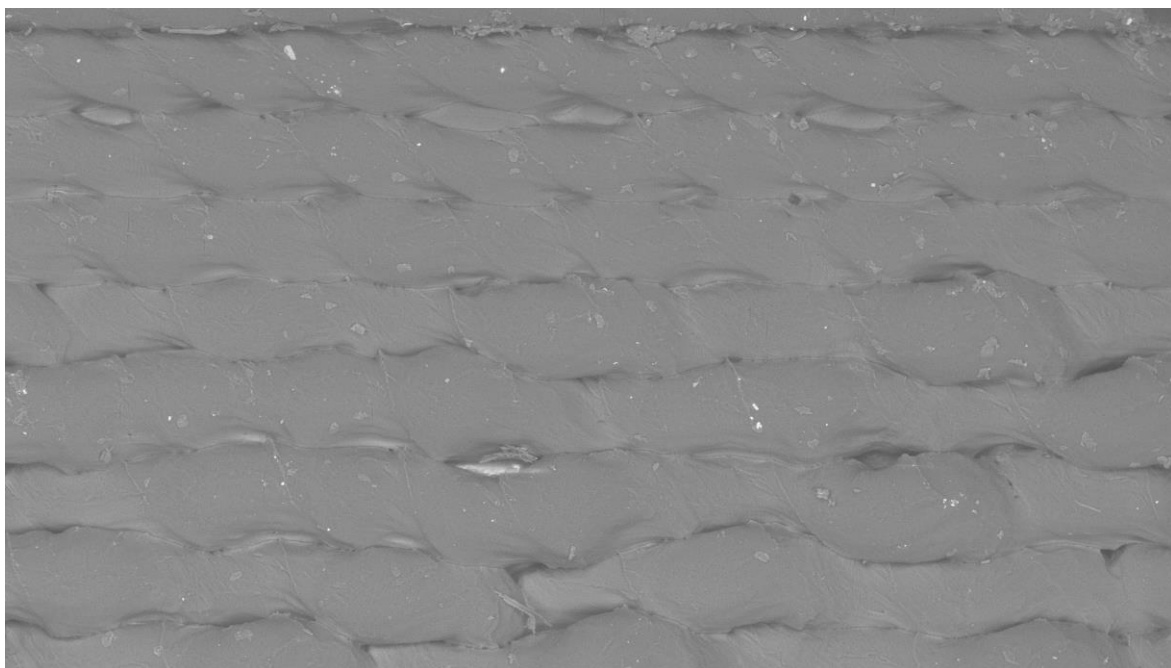
Z experimentu dále vyplývá, že struktura lomové plochy má vliv na výslednou pevnost. Lze vypořádat proč vzorky z Freeformeru měly nejnižší pevnost, je to proto, že tyto vzorky měli vůči ostatním metodám pórovitou strukturu povrchu. Další dvě metody měli hladký povrch, na kterém se hůře iniciuje trhlinka a to má zásadní vliv na mez pevnosti v tahu. Zásadní vliv má i struktura vnějšího povrchu. Na snímcích lze vidět, že povrch u FDM je hladší, proto se hůř iniciuje lomová trhlinka.



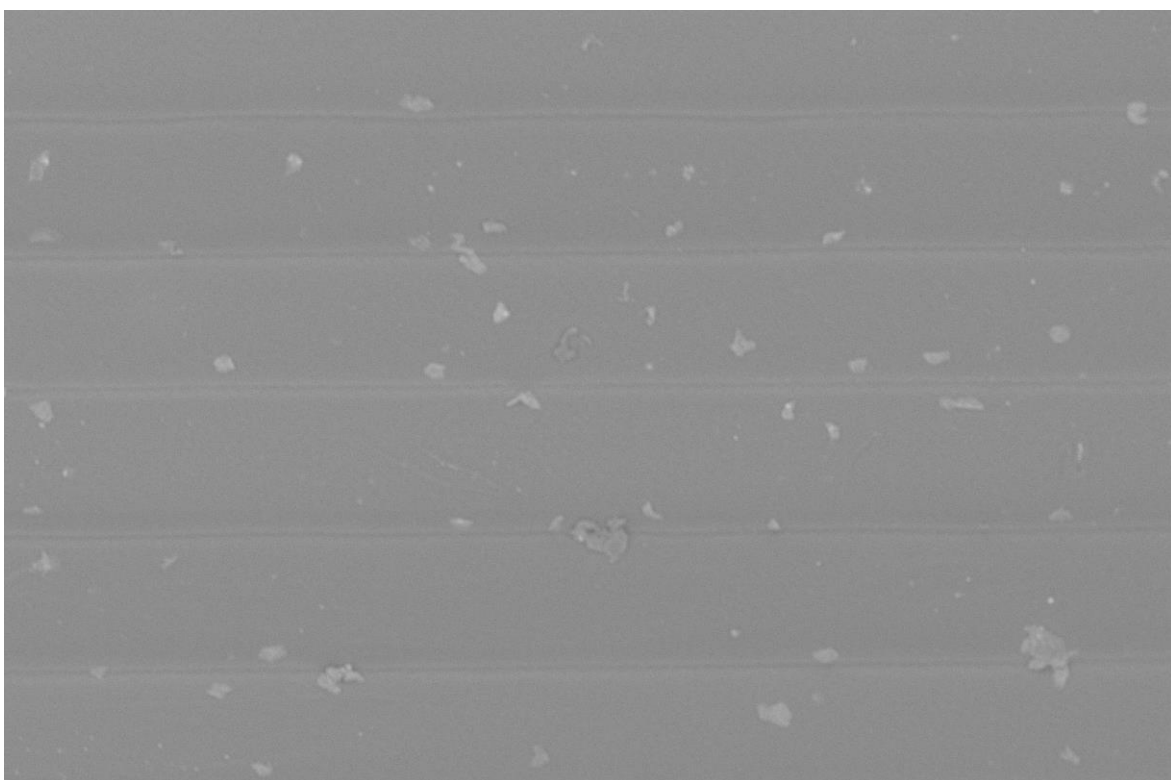
Obr. 39 Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou APF, materiál ASA



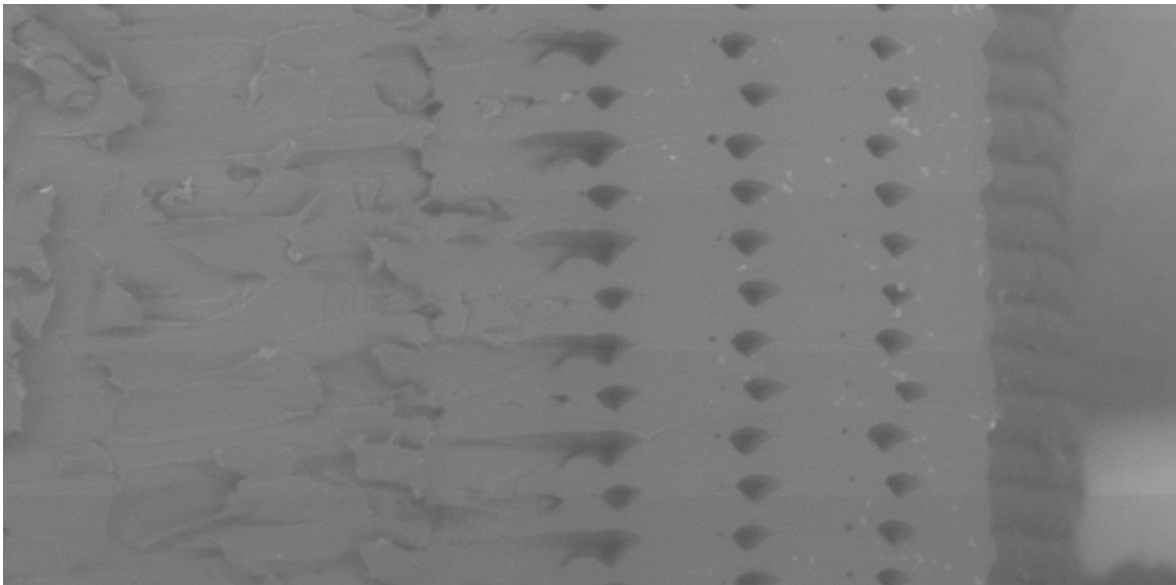
Obr. 40 Lomová plocha u technologie APF, snímek pořízen pomocí SEM



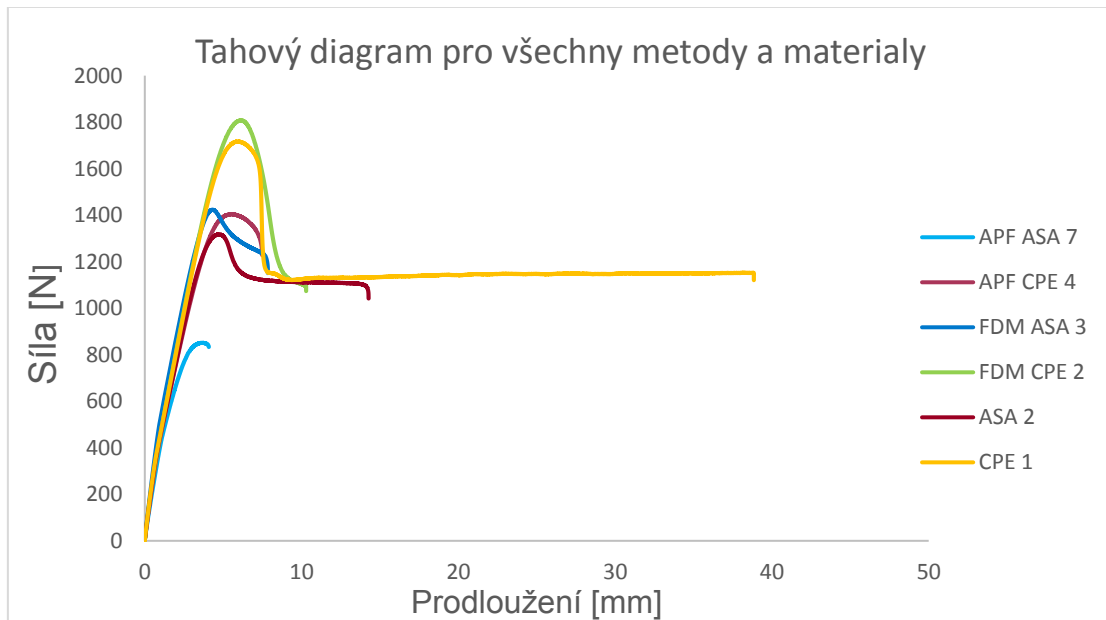
**Obr. 41** Struktura vnějšího povrchu u technologie APF, snímek pořízen pomocí SEM



**Obr. 42** Struktura vnějšího povrchu u technologie APF, snímek pořízen pomocí SEM



Obr. 43 Lomová plocha u FDM, snímek pořízen pomocí SEM



Obr. 44 Tahové křivky pro všechny technologie a materiály



## 7 ZÁVĚR

V této práci bylo hlavním cílem srovnání metody FDM a APF vůči referenčnímu vzorku vyrobenému metodou vstřikování plastů. Dalšími vedlejšími cíli bylo určení na kterém materiálu se budou tyto vlastnosti zkoumat. Na základě znalostí získaných z odborných článků byly navrženy zkušební vzorky a jejich koncepce výroby. Koncepce výroby vzorků zahrnovalo jaké procesní parametry nastavíme.

Zkušební vzorky byly navrženy pro zkoušku tahem pro zatížením jednoosým tahem, pro tuto zkoušku byla zvolena norma ISO 527-2. Pro vypracování práce bylo zvoleno 10 vzorků pro každou metodu a materiál. To bylo zvoleno proto abychom měli větší statistický soubor, který bude vykazovat větší přesnost, než kdyby bylo jen 5 vzorku pro každou metodu.

V této práci byly zkoumány jen dva materiály společnosti Fillamentum, zkoumány byly materiály CPE a ASA, v budoucnu lze prozkoumat i další polymerní materiály, abychom mohli říct, jestli jsou zjištění této práce pravdivá, nabízí se buď prozkoumat další materiály společnosti Fillamentum nebo materiály od jiných výrobců.

Na základě získaných výsledků se nabízí v další práci prozkoumat jaké jsou nejlepší procesní parametry pro tisk na Freeformeru, nebo jaké materiály se vykazují nejlepší pevnostní charakteristiky.

Po tahových zkouškách se objevilo, že vzorky z Freeformeru jsou velmi pórovité oproti FDM tisku. Další práce by mohli prozkoumat jak moc pórovité jsou jednotlivé výtisky z různých technologií.

Všechny cíle této bakalářské práce byly splněny.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Nejvíce používané metody 3D tisku. *Aranca.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/ip-research/3d-printing-in-plastics>
- [2] Termoplast. *Wikipedia* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16].
- [3] Thermoplastics. *Polymers International* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://polymers.com.au/thermoplastics/>
- [4] Termoplasty- základní druhy. *Polymery* [online]. Code Creator, ISBN 978-80-88058-68-7 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [5] CPE polymer. *Fillamentum* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/cpe-filaments/products/cpe-hg100-natural>
- [6] Materiálový list CPE. *Fillamentum* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://www.dropbox.com/sh/v7pxxt4kp4bbq0d/AADrGfc1GW3ogm8LrD1xB\\_DJa?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet\\_CPE+HG100\\_03012019.pdf](https://www.dropbox.com/sh/v7pxxt4kp4bbq0d/AADrGfc1GW3ogm8LrD1xB_DJa?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet_CPE+HG100_03012019.pdf)
- [7] Použití materiálu CPE. *Filamentum Industrial* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.fillamentumindustrial.com/cpe-hg100>
- [8] ASA polymer. *Treatstock* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.treatstock.com/material/asa>
- [9] Materiálový list ASA. *Fillamentum* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://www.dropbox.com/sh/v7pxxt4kp4bbq0d/AADrGfc1GW3ogm8LrD1xB\\_DJa?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet\\_ASA+Extrafill\\_03012019.pdf](https://www.dropbox.com/sh/v7pxxt4kp4bbq0d/AADrGfc1GW3ogm8LrD1xB_DJa?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet_ASA+Extrafill_03012019.pdf)
- [10] Cenové porovnání materiálů. *Materialpro3D* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/>
- [11] ColorFabb color on demand. *Colorfabb.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/color-on-demand/ral-colors>

- [12] Technické materiály. *Fillamentum Industrial* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.fillamentumindustrial.com/materials>
- [13] WITTBRODT, a BEN A JOSHUA M. PEARCE. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing* [online]: 2015. b.r., , 110–116. ISSN 22148604.
- [14] 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 & Design* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **124**, 143-157 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065. ISSN 0264-1275.
- [15] Slicer. *Slicer.org* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings>
- [16] HERMANN, Stefan. *CNC kitchen* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/7037/what-are-the-advantages-of-gyroid-infill>
- [17] PODROUŽEK, Jan, Marco MARCON, Krešimir NINČEVIĆ a Roman WANWENDNER. Bio-Inspired 3D Infill Patterns for Additive Manufacturing and Structural Applications. *Materials* [online]. MDPI AG, 2019, **12**(3), 499 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.3390/ma12030499. Dostupné z: <https://doaj.org/article/38d7b1e207fe4319813b41d3c7c2fc45>
- [18] Informace o infillu. *All3dp.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>
- [19] LETCHER, Todd, Behzad RANKOUHI a Sina JAVADPOUR. *Experimental Study of Mechanical Properties of Additively Manufactured ABS Plastic as a Function of Layer Parameters*. 2015. DOI: 10.1115/IMECE2015-52634.
- [20] KREJBYCHOVÁ, Adéla. *Analýza mechanických vlastností plastových dílů realizovaných 3D tiskem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [21] NOVOSÁD, Ivan. *Mechanické vlastnosti PLA dílů realizovaných 3D tiskem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2018.

- [22] Orientace vzorku. *Sculpteo* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2014/05/14/material-considerations-choose-right-plastic-production-method-part-2/>
- [23] Rozdílné výšky vrstvy. *Blog.prusaprinters.org* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter/>
- [24] KUZNETSOV, Vladimir, Alexey SOLONIN, Oleg URZHUMTSEV, Richard SCHILLING a Azamat TAVITOV. *Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process*. 2018, **07**. DOI: 10.4172/2169-0022.1000429.
- [25] 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]. Elsevier Ltd, 2014, **58**(), 242-246 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.038. ISSN 0261-3069.
- [26] MARTÍNEZ, J., J.I. DIÉGUEZ, E. ARES, A. PEREIRA, P. HERNÁNDEZ a J.a. PÉREZ. Comparative between FEM Models for FDM Parts and their Approach to a Real Mechanical Behaviour. In: *Procedia Engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **63**, s. 878-884 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.230. ISSN 1877-7058.
- [27] Aditivní výroba metodou APF. *Arburg* [online]. b.r. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/spektrum-sluzeb/aditivni-vyroba/technologie-apf/>
- [28] Aditivní výroba metodou APF. *Arburg* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg\\_freeformer\\_680836\\_en\\_gb/#](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_freeformer_680836_en_gb/#)
- [29] Aditivní výroba metodou APF. *Arburg* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/mediateka/video/spolecnost/arburg-plastic-freeforming-apf-2017/>
- [30] Ukázka vrstvy APF. *Plastix-world.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.plastix-world.com/the-true-3d-revolution/>
- [31] Introduction to FDM 3D printing. *3dhubs.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>

- [32] 3D printing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)
- [33] Princip FDM. *Additive3d.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/>
- [34] Datasheet podle ISO 527. *Verbatim-europe.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.verbatim-europe.cz/cz/prod/verbatim-pla-filament-1-75mm-1kg-white-55268/>
- [35] Material pro 3D. *Materialpro3d.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/>
- [36] 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*. Mary Ann Liebert, Inc., publishers, 2016, **3**(3), 183-192. DOI: 10.1089/3dp.2015.0036. ISSN 2329-7662. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>
- [37] WITTBRODT, Ben a Joshua PEARCE. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing*. 2015, **8**, 110-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>. ISSN 2214-8604. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860415000494>
- [38] Prusa Mk3. *Prusa.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s.html>
- [39] CANTRELL, Jason, Sean ROHDE, David DAMIANI et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal* [online]. Bradford: Emerald Group Publishing Limited, 2017, **23**(4), 811-824 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1108/RPJ-03-2016-0042. ISSN 13552546. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1917908079/>
- [40] ČSN EN ISO 527-2. *ČSN EN ISO 527-2.: Plasty - Stanovení tahových vlastností. 2.* Brusel, 2012.

- [41] DOWLING, Norman. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson, 2013. ISBN isbn01-313-9506-8.
- [42] Arburg Freeformer vlastnosti. *Teknologidager.no* [online]. b.r. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z:  
[http://www.teknologidager.no/uploads/2/6/2/1/26210140/arburgs\\_freeformer\\_-\\_making\\_3d-details\\_directly\\_form\\_standard\\_polymers\\_marek\\_zloch\\_arburg\\_gmbh.pdf](http://www.teknologidager.no/uploads/2/6/2/1/26210140/arburgs_freeformer_-_making_3d-details_directly_form_standard_polymers_marek_zloch_arburg_gmbh.pdf)
- [43] Obrázek různých materiálu. *Amazon* [online]. b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z:  
[https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/816BNH8c2PL.\\_SL1500\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/816BNH8c2PL._SL1500_.jpg)

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Symbol/zkratka	Jednotka	Popis
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Hustota
$\sigma_m$	[MPa]	Mez pevnosti
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu
$T_g$	[°C]	Teplota skelného přechodu
T	[°C]	Teplota tisku
Transmittance	[% ]	Propustnost světla
$T_t$	[°C]	Teplota tavení
$T_{HB}$	[°C]	Teplota podložky
v	[mm/s]	Rychlosti tisku
$F_m$	[N]	Síla
S	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha
m	[g]	Hmotnost
L	[m]	Délka
3D		trojrozměrný
ASTM		American Society for Testing and Materials
CAD		Computer Aided Design
FDM		Fused Deposition Modelling
APF		Arburg Plastic Freeforming

ISO	International Organization for Standardization
PLA	Polylactid Acid
ASA	Akrylonitril-styren-akryl.
CPE	co-polyester
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PET-G	Polyetyléntereftalát-glycol
SEM	Scanning electron microscope
RAL	Standart pro stupnici barevných odstínů

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr 1</b> Rozdělení plastů [3]	15
<b>Obr. 2</b> Různé barevné možnosti jednoho materiálu [13]	17
<b>Obr. 3</b> Porovnání délky tisku na typu vnitřní výplně [16].	19
<b>Obr. 4</b> Ukázka typů výplní a hustoty výplně [18].	20
<b>Obr. 5</b> Orientace výplně: 0° (nahore),	20
<b>Obr. 6</b> Výsledky tahové zkoušky pro různé orientace výplně [19]	20
<b>Obr. 7</b> Porovnání mezí pevností v závislosti na stylů výplně [21]	21
<b>Obr. 8</b> Orientace zkušebních těles [22]	21
<b>Obr. 9</b> Mez pevnosti v závislosti na orientaci výtisku a výšce vrstvy [14]	22
<b>Obr. 10</b> Rozdíl ve výškách vrstvy [23]	22
<b>Obr. 11</b> Délka tiskového času při stejné výšce vrstvy ale při jiné [23]	23
<b>Obr. 12</b> a) vrstvený kompozit s oboustranným uspořádáním vláken b) vrstvený jednosměrný kompozit [26]	23
<b>Obr. 13</b> Obrázek z SEM kde lze vidět velikost vzduchových mezer [24]	24
<b>Obr. 14</b> Schéma principu stroje Arburg Freeformer [27]	25
<b>Obr. 15</b> Pohled na Freeformerem vytisklou vrstvu [30]	25
<b>Obr. 16</b> Princip FDM [33]	26
<b>Obr. 17</b> 3D tiskárna Průša i3 Mk3 [38]	30
<b>Obr. 18</b> Další parametry tisku	31
<b>Obr. 19</b> Arburg Freeformer [28]	32
<b>Obr. 20</b> Zkušební těleso 1A dle normy ISO 527-2 [40]	32
<b>Obr. 21</b> Zkušební těleso 1B dle normy ISO 527-2 [40]	33
<b>Obr. 22</b> Rozměry zkušebního tělesa dle normy ISO 527-2 [40]	33
<b>Obr. 23</b> Deformace při tahové zkoušce tvárného materiálu a) nezatížený vzorek b) při rovnoměrném prodlužování c) při zužování (tvorba krčku) [41].	34
<b>Obr. 24</b> Foto stroje Zwick Z020	35
<b>Obr. 25</b> Zkušební tělesa před testováním	36
<b>Obr. 26</b> Grafické znázornění získaných dat s intervalem pro mez pevnosti	37



<b>Obr. 27</b> Tahové křivky pro vzorky vyrobené na stroji Arburg Freeformer, materiál ASA	38
<b>Obr. 28</b> Tahové křivky pro vzorky vyrobené na stroji Arburg Freeformer, Materiál CPE	38
<b>Obr. 29</b> Tahové křivky pro vzorek vyrobený injekčním vstřikováním plastů, Materiál ASA	39
<b>Obr. 30</b> Tahové křivky pro vzorek vyrobený vstřikováním plastů, Materiál CPE	39
<b>Obr. 31</b> Tahové křivky pro vzorek vyrobený na tiskárně Prusa i3 Mk3, Materiál ASA	40
<b>Obr 32</b> Tahové křivky pro vzorek vyrobený na tiskárně Prusa i3 Mk3, Materiál CPE	40
<b>Obr. 33</b> Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou APF, materiál ASA	41
<b>Obr. 34</b> Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou APF, materiál CPE	41
<b>Obr. 35</b> Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou injekčního vstřikování plastů, materiál ASA	42
<b>Obr. 36</b> Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou injekčního vstřikování plastů, materiál CPE	42
<b>Obr. 37</b> Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou FDM, materiál ASA	43
<b>Obr. 38</b> Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou FDM, materiál CPE	43
<b>Obr. 39</b> Lomová plocha u vzorku vyrobeného metodou APF, materiál ASA	45
<b>Obr. 40</b> Lomová plocha u technologie APF, snímek pořízen pomocí SEM	45
<b>Obr. 41</b> Struktura vnějšího povrchu u technologie APF, snímek pořízen pomocí SEM	46
<b>Obr. 42</b> Struktura vnějšího povrchu u technologie APF, snímek pořízen pomocí SEM	46
<b>Obr. 43</b> Lomová plocha u FDM, snímek pořízen pomocí SEM	47
<b>Obr. 44</b> Tahové křivky pro všechny technologie a materiály	47

## 11 SEZNAM TABULEK

<b>tab. 1</b>	Vlastnosti materiálu [6] .....	16
<b>tab. 2</b>	Vlastnosti materiálu [9] .....	17
<b>tab. 3</b>	Jednotlivé vlastnosti v závislosti na barvě materiálu [14] .....	19
<b>tab. 4</b>	Použité nastavení pro tisk ASA a CPE .....	31
<b>tab. 5</b>	Použité nastavení pro tisk ASA a CPE .....	32
<b>tab. 6</b>	Porovnání jednotlivých vzorků .....	38
<b>tab. 7</b>	Porovnání jednotlivých vzorků .....	45

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Protokol z tahové zkoušky 2019

Příloha 2: Soubory se záznamy tahové zkoušky

Příloha 3: Soubor excel se statistikou experimentu

Příloha 4: Model zkušebního tělesa v .stl

# 13 PROTOKOL Z TAHOVÉ ZKOUŠKY

Protokol o zkoušce tahem

14.05.2019

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

VUT FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

**Výsledky zkoušek:**

Nr	Vzorek	E modul N/mm <sup>2</sup>	F max N	Rm N/mm <sup>2</sup>
1	APF-ASA-1	809,60	677,76	16,94
2	APF-ASA-2	779,74	593,27	14,83
3	APF-ASA-3	804,15	753,15	18,83
4	APF-ASA-4	764,80	596,92	14,92
5	APF-ASA-5	784,48	704,50	17,61
6	APF-ASA-7	877,08	851,16	21,28
7	APF-ASA-8	808,58	632,41	15,81
8	APF-ASA-10	792,99	738,79	18,47
9	APF-ASA-11	823,17	756,75	18,92
10	APF-ASA-12	769,58	596,24	14,91
11	APF-CPE-1	900,20	1200,10	30,00
12	APF-CPE-2	918,80	1239,66	30,99
13	APF-CPE-3	898,29	1233,25	30,83
14	APF-CPE-4	998,04	1403,46	35,09
15	APF-CPE-5	1007,15	1355,94	33,90
16	APF-CPE-6	990,42	1328,53	33,21
17	APF-CPE-7	887,24	1132,42	28,31
18	APF-CPE-8	881,07	1202,96	30,07
19	APF-CPE-9	892,65	1168,24	29,21
20	APF-CPE-10	957,06	1323,36	33,08
21	FDM-ASA-1	1172,64	1408,00	35,20
22	FDM-ASA-2	1149,73	1367,94	34,20
23	FDM-ASA-3	1145,22	1423,51	35,59
24	FDM-ASA-4	1154,80	1412,06	35,30
25	FDM-ASA-5	1152,69	1413,24	35,33
26	APF-ASA-6	817,43	751,14	18,78
27	FDM-ASA-8	1132,28	1342,74	33,57
28	FDM-ASA-9	1146,88	1405,30	35,13
29	FDM-ASA-6	1149,97	1382,78	34,57
30	FDM-ASA-10	1133,70	1361,46	34,04
31	FDM-ASA-11	1150,97	1365,59	34,14
32	FDM-CP-1	1148,82	1737,96	43,45
33	FDM-CP-2	1100,76	1807,48	45,19
34	FDM-CP-3	1115,16	1544,84	38,62
35	FDM-CP-4	1065,91	1448,72	36,22
36	FDM-CP-5	1152,82	1794,43	44,86
37	FDM-CP-6	1052,37	1474,64	36,87
38	FDM-CP-8	1091,88	1555,88	38,90
39	FDM-CP-9	1145,12	1794,22	44,86
40	FDM-CP-10	1151,05	1725,20	43,13
41	FDM-CP-11	1095,24	1562,27	39,06
42	FDM-CP-12	1195,02	1821,53	45,54
43	ASA-1	1055,40	1308,20	32,70
44	ASA-2	1057,75	1317,43	32,94
45	ASA-3	1053,42	1303,31	32,58
46	ASA-4	1044,02	1302,79	32,57

VUT FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Nr	Vzorek	E modul N/mm <sup>2</sup>	F max N	Rm N/mm <sup>2</sup>
47	ASA-5	1039,39	1289,16	32,23
48	CPE-1	1091,34	1716,80	42,92
49	CPE-2	1113,88	1711,10	42,78
50	CPE-3	1110,12	1712,36	42,81
51	CPE-4	1103,48	1712,55	42,81
52	CPE-5	1098,15	1683,74	42,09

Zkoušel: -