

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Přehled a porovnání PLA materiálů pro plastový 3D tisk

Overview and comparison of PLA materials for plastic 3D printing

## **STUDIJNÍ PROGRAM**

Výroba a ekonomika ve strojírenství

## **STUDIJNÍ OBOR**

Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

## **VEDOUCÍ PRÁCE**

Ing. Vladislav Andronov

KRŮTA

VOJTĚCH

**2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krůta** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **482417**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Přehled a porovnání PLA materiálů pro plastový 3D tisk**

Název bakalářské práce anglicky:

**Overview and comparison of PLA materials for plastic 3D printing**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do technologie plastového 3D tisku.
2. Rešerše problematiky související s tiskem PLA.
3. Návrh metodiky testování a provedení experimentu.
4. Shrnutí výsledků a závěrečné vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

Aktuálně dostupné materiálové listy od výrobců  
MILOVANOVIĆ, Aleksa, Aleksandar SEDMAK, Aleksandar GRBOVIĆ, Zorana GOLUBOVIĆ, Goran MLADENOVIĆ, Katarina ČOLIĆ a Miloš MILOŠEVIĆ. Comparative analysis of printing parameters effect on mechanical properties of natural PLA and advanced PLA-X material. Procedia Structural Integrity [online]. 2020, 28, 1963-1968 [cit. 2021-03-22]. ISSN 24523216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2020.11.019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vladislav Andronov, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Vladislav Andronov  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

KRŮTA, Vojtěch. *Přehled a porovnání PLA materiálů pro plastový 3D tisk*. Praha: ČVUT 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne:

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vladislavu Andronovovi za trpělivost, věcné připomínky a rady při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. a Ing. Janu Šimotovi za pomoc a rady týkající se zpracování experimentální části. Také bych rád poděkoval své rodině za neutuchající podporu během studia.

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou plastového 3D tisku metodou FDM. Cílem práce je vytvoření přehledu a porovnání PLA materiálů dostupných na českém trhu. Rešeršní část práce popisuje historii a vývoj aditivních technologií, technologii FDM tisku a materiál PLA. U materiálu PLA se práce primárně zaměřuje na běžné chyby během tisku. Dále poté specifikuje zkušební artefakty pro aditivní výrobu a popisuje jejich historii a vývoj, zmiňuje taktéž užití artefaktů u hobby 3D tisku. Poslední kapitola rešeršní části jmenuje a specifikuje optimální tiskové parametry pro technologii FDM. Experimentální část obsahuje komplexní testování materiálu PLA od více výrobců v různých cenových kategoriích. Jedná se o výrobce Prusament, Devil Design, Sunlu, C-Tech, Verbatim, Tronxy, Plasty Mladeč a Gembird. Nejdříve je popsána metodika testování, ve které je zahrnuto tištění vzorků na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+, tahová zkouška vzorků probíhající dle normy ČSN EN ISO 527-1 a analýza zkušebních artefaktů pomocí průmyslového tomografu Zeiss Metrotom 1500. Dále jsou poté shrnuty výsledky testování a je provedeno jejich konečné vyhodnocení. U vzorků tištěných v ose X dosáhl největší pevnosti se 48,23 MPa výrobce Devil Design, který disponoval nejvyšší pevností taktéž u vzorků v ose Y, a to 57,48 MPa. Nejnižší pevnosti disponovaly vzorky tištěné v ose Z, kde se jako nejlepší ukázal Prusament s hodnotou 34,80 MPa. U měření rozměrové přesnosti vnitřních otvorů dosáhli nejlepších výsledků Prusament a Plasty Mladeč s odchylkami pouhých 0,01 mm, naopak u analýzy vnějších rozměrů byla naměřena nejpřesnější hodnota výrobcí Devil Design, a to 14,91, respektive 24,91 mm. Nejlepším převisem disponoval vzorek od výrobce C-Tech, který dokázal vytisknout 75° převis naprosto přesně. Dle celkových výsledků se jako nejlepší filament ukázalo PLA od C-Techu, které taktéž dosáhlo nejlepších výsledků po započtení cenového kritéria neboli poměru „cena-výkon“.

## Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, FDM, PLA, zkušební artefakt, porovnání materiálů

# Abstract

This Bachelor's thesis deals with the problematics of the plastic 3D print by the FDM method. The aim of the work is to make a list and to compare PLA materials which are available at the Czech market. The research part of this thesis describes the history and development of additive technologies, the technology of FDM print and the PLA material. This thesis focuses on common errors during the print by the PLA material primarily. Further it specifies test artefacts for the additive production and describes their history and development, it mentions using artefacts by the hobby print as well. The last chapter of this research part appoints and specifies optimal printing parameters for the FDM technology. The experimental part includes the complex PLA material testing by more producers in different price categories. It is about Prusament Devil Design, Sunlu, C-Tech, Verbatim, Tronxy, Plasty Mladeč and Gembrid producers. At first the testing methodology is described, the printing of samples at the Original Prusa i3 MK3S+ is included, the tensile test of samples running according to the ČSN EN ISO 527-1 standard and the analysis of testing artefacts with the help of the industrial tomograph Zeiss Metrotom 1500. The results of testing are summed up further and their final evaluation is realized. For the samples printed in the axis X the producer Devil Design has accomplished the highest tensile strength of 48,23 MPa who has disposed of the highest tensile strength by the axis Y samples as well namely 57,48 MPa. The samples printed in the axis Z have disposed of the lowest tensile strength, where the Prusament has disposed the highest tensile strength of 34,80 MPa. By the measurement of the dimensional accuracy of inner holes the Prusament and Plasty Mladeč have accomplished the best results with the divergences 0.01 mm only on the other hand by the Devil Design the most accurate value of outer measurements has been measured by the dimensional analysis namely 14,91 respectively 24,91 mm. The sample by the C-Tech producer has disposed of the best overhang, which has accomplished to print the 75° overhang exactly. According to the overall results the best filament is by the C-Tech producer, which has also accomplished the best results after the price criterion counting or the price – performance ratio.

## Key words

Additive technology, 3D print, FDM, PLA, test artifact, material comparison

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod .....  | 10        |
| <b>1 Úvod do technologie plastového 3D tisku .....</b>            | <b>12</b> |
| 1.1 Historie 3D tisku .....                                       | 14        |
| 1.2 Aditivní výroba .....   | 15        |
| 1.3 Postup výroby pomocí 3D tisku.....                            | 18        |
| 1.4 FDM tisk .....  | 19        |
| 1.5 Materiály pro FDM tisk .....                                  | 21        |
| 1.6 PLA .....   | 22        |
| <b>2 Rešerše problematiky související s tiskem PLA.....</b>       | <b>24</b> |
| 2.1 Nejběžnější chyby při tisku z PLA .....                       | 24        |
| 2.2 Zkušební artefakty pro 3D tisk .....                          | 28        |
| 2.3 Vliv parametrů na 3D tisk z PLA .....                         | 30        |
| 2.3.1 Teplota tisku .....   | 30        |
| 2.3.2 Výška vrstvy .....  | 31        |
| 2.3.3 Rychlost tisku .....  | 32        |
| 2.3.4 Hustota výplně .....  | 33        |
| 2.3.5 Orientace modelu na tiskové podložce .....                  | 33        |
| 2.3.6 Barva filamentu.....  | 35        |
| 2.4 Analýza problému a cíl práce .....                            | 36        |
| <b>3 Návrh metodiky testování a provedení experimentu.....</b>    | <b>38</b> |
| 3.1 Volba vzorků.....   | 38        |
| 3.2 Tisk vzorků .....   | 39        |
| 3.3 Zkouška tahem.....  | 44        |
| 3.4 Analýza zkušebních artefaktů pomocí výpočetní tomografie..... | 45        |
| <b>4 Shrnutí a vyhodnocení výsledků testování .....</b>           | <b>49</b> |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1      | Zkouška tahem tiskových strun .....    | 49        |
| 4.2      | Zkouška tahem tištěných vzorků .....   | 50        |
| 4.2.1    | Vzorky v ose X .....                   | 50        |
| 4.2.2    | Vzorky v ose Y .....                   | 52        |
| 4.2.3    | Vzorky v ose Z.....                    | 54        |
| 4.3      | Analýza zkušebních artefaktů .....     | 56        |
| 4.3.1    | Analýza kvality tisku .....            | 56        |
| 4.3.2    | Analýza rozměrové přesnosti tisku..... | 59        |
| <b>5</b> | <b>Diskuze.....</b>                    | <b>65</b> |
| <b>6</b> | <b>Závěr .....</b>                     | <b>68</b> |
|          | <b>Seznam použité literatury .....</b> | <b>70</b> |
|          | <b>Seznam obrázků.....</b>             | <b>76</b> |
|          | <b>Seznam tabulek .....</b>            | <b>78</b> |
|          | <b>Seznam příloh.....</b>              | <b>79</b> |

# Úvod

Aditivní technologie jsou progresivním výrobním odvětvím, jehož vývoj se datuje do 80. let 20. století. Jedná se o nekonvenční výrobní technologie, využívající principu výroby tělesa pomocí postupného nanášení jednotlivých vrstev. V dnešní době je tato technologie využívána v různých průmyslových odvětvích, od automobilového průmyslu přes zdravotnictví až po stavebnictví. Co se týče počtu uživatelů, tak převládající formou této technologie je plastový 3D tisk a nejvyužívanější metodou tisku je metoda FDM. Tuto oblíbenost způsobuje značný nárůst popularity domácích "hobby" tiskáren v posledních letech, které jsou z velké části konstruovány právě na bázi FDM.

Nespornou výhodou aditivní technologie je velká variabilita při výrobě i značně odlišných výrobků. Není tedy nutné pro každý typ výrobku kupovat speciální přípravky, nástroje či stroje. Další výhodou je krátký časový úsek mezi vytvořením modelu součásti a jeho realizací. Proto jsou aditivní technologie běžně využívány k výrobě prototypů, koncepčních výrobků či malého množství tvarově složitých dílů. V medicíně můžeme nalézt aplikaci aditivní technologie při výrobě zdravotnických nástrojů či přesných implantátů.

Mezi hobby tiskaři je celosvětově nejpopulárnější materiál PLA neboli kyselina polyléčná. Jedná se o rozložitelný biomateriál, který si svou popularitu získal díky své nízké ceně, nulové toxicitě či zápachu a nenáročnému tisku.

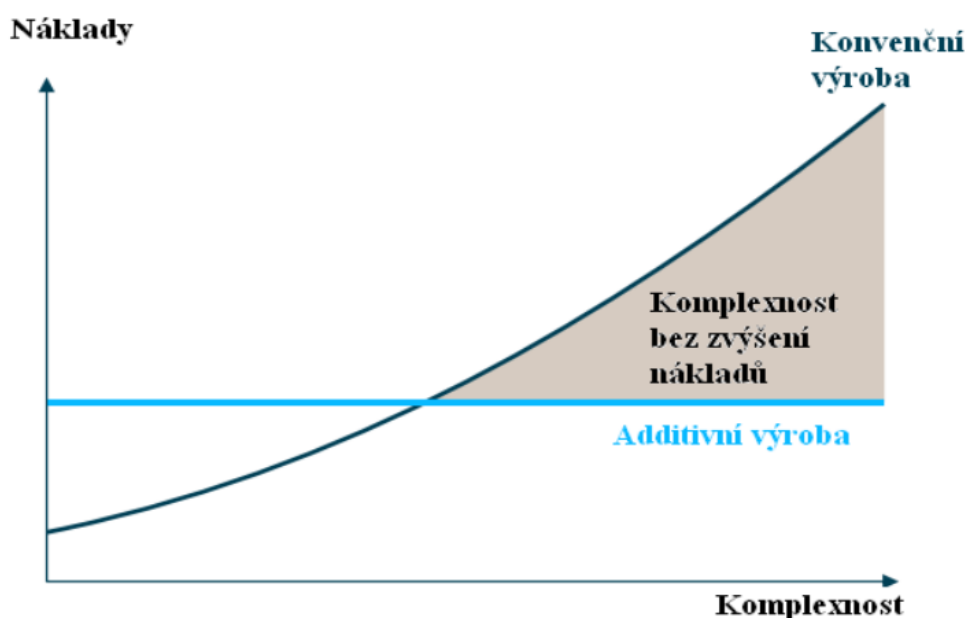
Motivací autora k sepsání této práce byla snaha o hlubší poznání této stále nepřilíživě probádané technologie a po nákupu vlastní tiskárny od firmy Prusa Research i nový koníček.

Cílem práce je porovnat materiál PLA od různých výrobců pomocí analýzy mechanických vlastností, rozměrové přesnosti a kvality tisku. Všechny vzorky byly vytištěny na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ za použití stejných parametrů v různých orientacích. Výsledky všech materiálů byly porovnány mezi sebou. Na úplný závěr byl do výsledků také zahrnut cenový faktor.

# TEORETICKÁ ČÁST

# 1 Úvod do technologie plastového 3D tisku

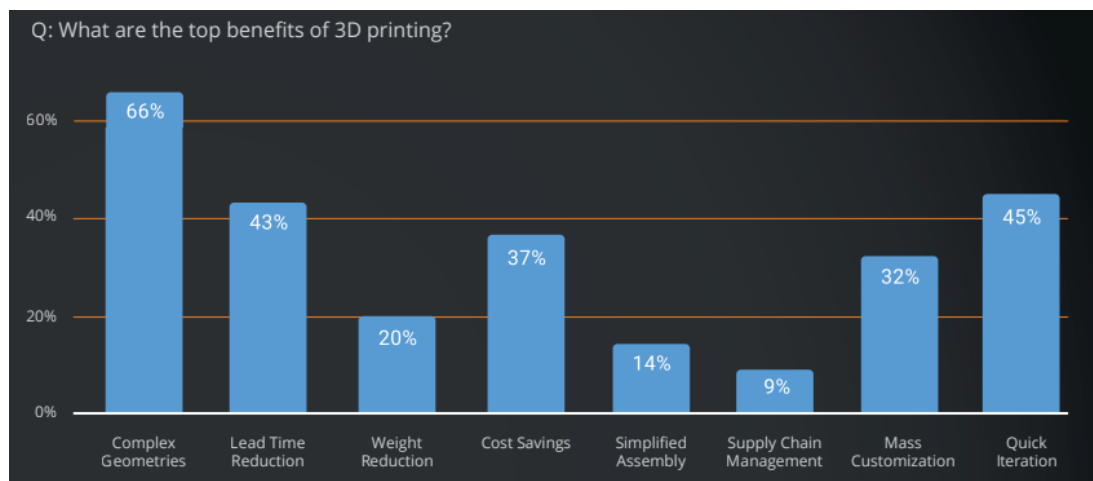
Aditivní výroba je výrobní odvětví, zaměřené na využití možností 3D tisku součástí z rozličných druhů materiálů s velkou variabilitou využití v různých sférách života. Cílem aditivní výroby je tvorba součástí, která je lehčí a odolnější než součást vyráběná konvenčními technologiemi, při zachování rozumné cenové hladiny. Tyto možnosti jsou dosažitelné pomocí dostupnosti moderních digitálních technologií. Princip aditivní výroby spočívá ve zhotovení součástí pomocí 3D tisku, využívající princip "layer-by-layer" neboli princip postupného kladení vrstev materiálu o konstantní tloušťce na sebe a tím tvorbu finálního modelu. Aditivní výroba přináší do výrobního procesu velkou flexibilitu a efektivitu výroby bez nutnosti dalších výdajů za specializované stroje a nástroje v případě výroby výrazně odlišných výrobků, tento efekt je viditelný na Obr. 1. [1]



Obr. 1 Komplexnost aditivní výroby [2]

Studie společnosti Sculpteo [3] shrnuje data a předpoklady 3D tisku za rok 2020. Dle této studie je procentuální rozložení užití 3D tiskáren stále ve prospěch pracovních účelů (59 %), oproti hobby tiskařům (24 %) a studijním účelům (17 %). Drtivá většina uživatelů jsou muži (89 %), hlavní základnou 3D tisku je s téměř 50% zastoupením Evropa, 88 % uživatelů již absolvovalo či momentálně absoluuje vysokoškolské vzdělání s největším zastoupením technických oborů (62 %). Tato studie také potvrdila, že 3D tisk je nejčastěji užíván k účelům výroby prototypů a koncepčních či testovacích modelů (68 %, resp. 59 % dotázaných). Nejvyužívanějšími materiály jsou s výrazným nárůstem plasty, následované kovy a pryskyřicí. Nejvyužívanější metodou 3D tisku je metoda FDM, dále poté SLS a SLA.

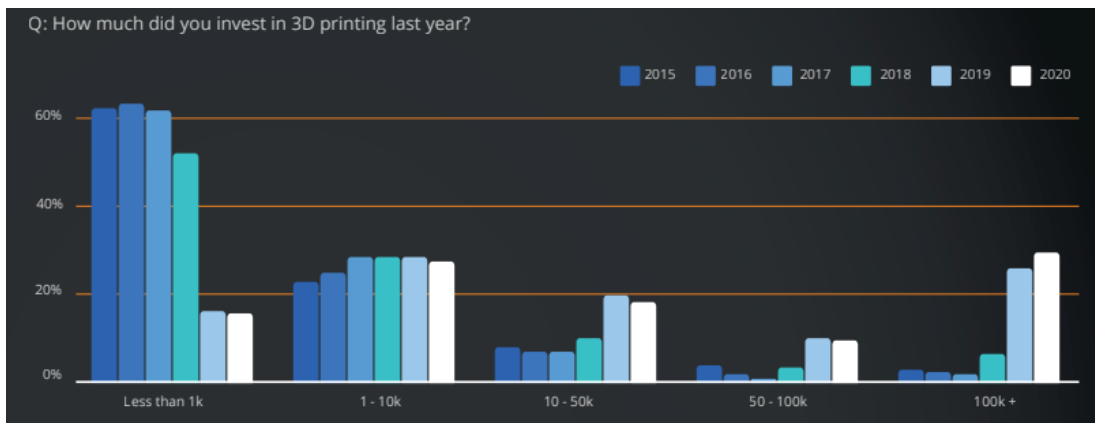
Dalším důležitým faktem je jmenování benefitů 3D tisku dle uživatelů. 66 % z nich uvedlo možnost tisku modelů s komplexní geometrií a 43 % snížení časových lhůt při vývoji (viz Obr. 2). [3]



Obr. 2 Benefity 3D tisku dle uživatelů [3]

Vstupní náklady a nedostatek znalostí v oblasti 3D tisku jsou dle uživatelů nejvýraznějšími limitujícími faktory pro adaptaci 3D tisku, primárně tedy stále pro výrobní účely. 50 % respondentů však věří, že i přes tyto problémy, doplněné o nedostatky samotného tisku (stále omezená přesnost, delší výrobní čas jednotlivých dílů či omezené využití materiálů) bude mít 3D tisk v budoucnu signifikantní roli ve výrobě, byznysu i u individuálních uživatelů. Až 70 % uživatelů vidí 3D tisk jako příležitost k získání výhody nad konkurencí, proto není překvapivým faktem, že 65 % uživatelů 3D tiskáren z oblasti výroby či byznysu se rozhodlo v roce 2020 k investování do tohoto odvětví, 29 % z investic dokonce překročilo hranici 100 tisíc dolarů. [3]

Při porovnání studií z let 2017 a 2020 je zřejmý vzrůstající vliv 3D tisku. V roce 2017 tvořilo 60 % investic do tohoto odvětví investice v maximální hodnotě tisíc dolarů, viz Obr. 3. Procentuální zastoupení 3D tisku pro účely výroby prototypů zůstává v obou letech velmi podobné, avšak zaznamenáváme nárůst užití pro koncepční či výukové účely. Rok od roku také stoupá využití kovových materiálů, pryskyřice i keramiky. Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, velké procento uživatelů vidí v 3D tisku potenciál k získání výhody nad konkurencí, proto rok od roku krom narůstajícího počtu uživatelů také narůstá procento těch, kteří investují do 3D tisku z důvodu zrychlení vývoje určitého výrobku, a tím získání důležité konkurenční výhody. [3]



Obr. 3 Procentuální podíl investic do oblasti 3D tisku [3]

## 1.1 Historie 3D tisku

První koncepty této technologie jsou datovány již do 70. let minulého století, avšak experimenty v tomto odvětví byly prováděny až od roku 1981. První pokusy prováděl Hideo Kodama z Výzkumného institutu v Nagoji, to on položil základy principu aditivní výroby známému jako "layer-by-layer", avšak kvůli problémům s financováním nedokázal dokončit proces patentování. Prvním patentovaným přístrojem se stal v roce 1986 stereolitografický přístroj (SLA) od Charlese Hulla, jeho první kus je viditelný na Obr. 4. Tento přístroj umožňoval výrobu modelů pomocí principu vytvrzování polymeru UV laserem. Tento vynálezce a spoluzakladatel společnosti 3D Systems stál za rozšířením aditivní výroby. V roce 1988 si Carl Deckard nechal patentovat technologii SLS (Selective Laser Sintering) neboli spékání materiálu v práškové podobě pomocí laseru. Historie v dnešní době nejvyužívanější metody aditivní výroby, a to technologie FDM (Fused Deposition Modelling), se datuje do roku 1989, kdy si tuto technologii nechal patentovat Scott Crump, spoluzakladatel společnosti Stratasys. [4,5,6]



Obr. 4 Tiskárna SLA-1 z roku 1988 [7]

V devadesátých letech a na přelomu tisíciletí docházelo k rozšiřování technologie 3D tisku v průmyslové výrobě. Ruku v ruce s rozšiřováním technologie 3D tisku docházelo také k rozvoji CAD programů, nutných k vytvoření modelů. Rok 1992 přinesl udělení patentu na výrobu technologií FDM firmě Stratasys, tento patent učinil z této společnosti do dnešní doby hlavního hráče na poli aditivní výroby. V roce 1999 se vědcům z Wake Forest Institute podařilo vytvořit buněčný scaffold pomocí 3D tisku, v roce 2000 se naopak podařilo vytisknout funkční ledvinu, avšak první transplantace vytištěného orgánu proběhla až v roce 2013. Aplikace 3D tisku v medicínské oblasti je i v dnešní době intenzivně zkoumaným a řešeným tématem, spousta odborníků v oblasti medicíny i 3D tisku vidí v tomto odvětví velkou budoucnost. [5,6,7]

Poslední desetiletí bylo v oblasti 3D tisku přelomové. Z důvodu expirace patentu došlo k masovému rozšíření technologie FDM, která se stala cenově dostupnější a tím i velmi zajímavou alternativou pro spoustu podniků. 3D tisk se pomocí konceptu RepRap, uvedeném na trh v roce 2009, rozšířil i do komerční sféry. Díky své obrovské variabilitě se jedná o skvělý nástroj pro domácí použití. Hlavní myšlenkou konceptu RepRap je reprodukovatelnost neboli aby jedna tiskárna dokázala vytisknout co nejvíce dílů pro jiné tiskárny. Pomocí tohoto konceptu jsou nyní vyráběny např. tiskárny od firmy Prusa Research, světově nejrozšířenější hobby tiskárny. Dalším z úspěchů 3D tisku na poli medicíny se stal tisk plně funkční protetické končetiny. 3D tisk je v dnešní době dokonce využíván jako prostředek ke stavbě domů či tisku aut, v těchto odvětvích jsme však stále teprve v počátcích vývoje. [6,7]

## 1.2 Aditivní výroba

Nejčastěji se aditivní výroba využívá pro tvorbu prototypových modelů jako tzv. rapid prototyping (RP). Tyto modely slouží k testování a hledání potenciálních chyb výrobku před jeho vstupem do konvenční výroby, pro tvorbu koncepčních modelů či pro zjištění zpětné vazby potenciálních zákazníků. Nejedná se však o jedinou možnost využití aditivní výroby. Obory jako Rapid Manufacturing (RM) nebo Rapid Tooling (RT) také fungují na obdobném principu a zhotovují se pomocí nich konečné výrobky, jakými jsou například nástroje pro další výrobu či složité kusové výrobky. [8]

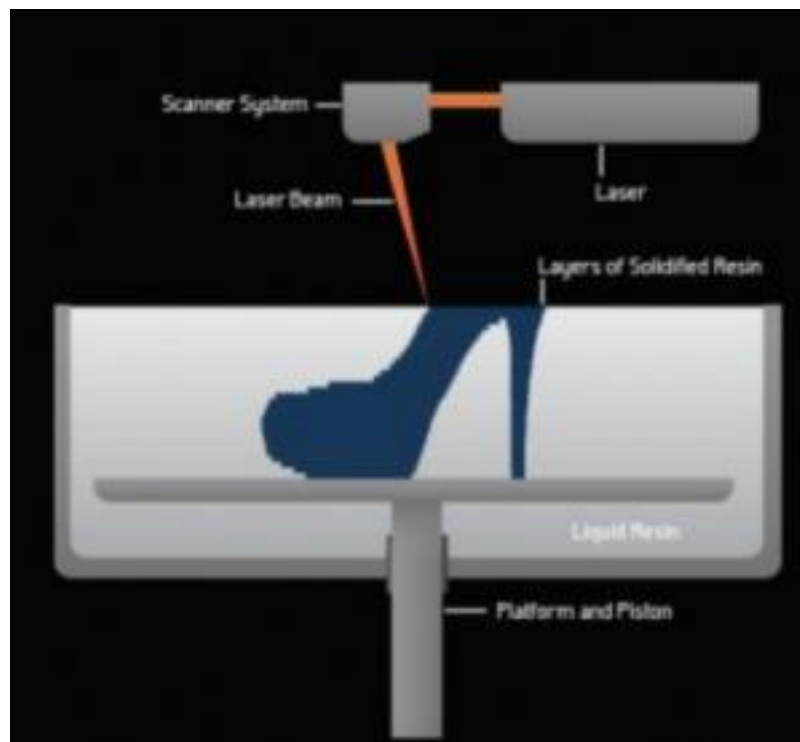
Mezi výhody aditivní výroby řadíme výrazné zkrácení doby návrhu a vývoje nového výrobku, snížení nákladů na vývoj, snížení rizik chybovosti během vývoje či možnost průběžného testování prototypu. Naopak nevýhodami této technologie je omezená přesnost výrobků zhotovených pomocí 3D tisku nebo častá nutnost značných počátečních nákladů, které neumožní využití této technologie všem podnikům. Dále poté limitované využití

materiálů či nepředvídatelnost některých vlastností (například mechanické vlastnosti nebo povrchové úpravy). [9]

Metody aditivní výroby řadíme do tří základních skupin, a to podle skupenství základního materiálu. Základní materiál může být tekutý, tuhý, či ve formě prášku.

Metody aditivní výroby, využívající tekutý základní materiál, jsou následující:

- SLA – Stereolitography (viz Obr. 5)
- SHS – Selective Heat Sintering
- MJP – Multijet printing
- DLP – Digital Light Processing



Obr. 5 Princip metody SLA [10]



Aditivní výroba s využitím práškovým materiálem:

- SLS – Selective Laser Sintering
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering
- BJ – Binder Jetting (viz Obr. 6)

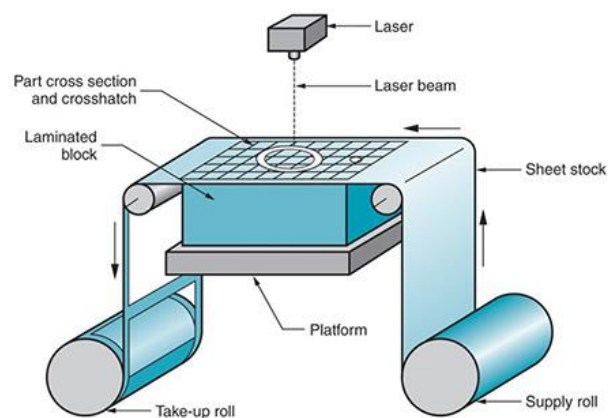


Obr. 6 Binder Jetting [11]

A nakonec metody aditivní výroby, využívající tuhý materiál:

- FDM – Fused Deposition Modelling
- LOM – Laminated Object Manufacturing (viz Obr. 7)

### Laminated Object Manufacturing

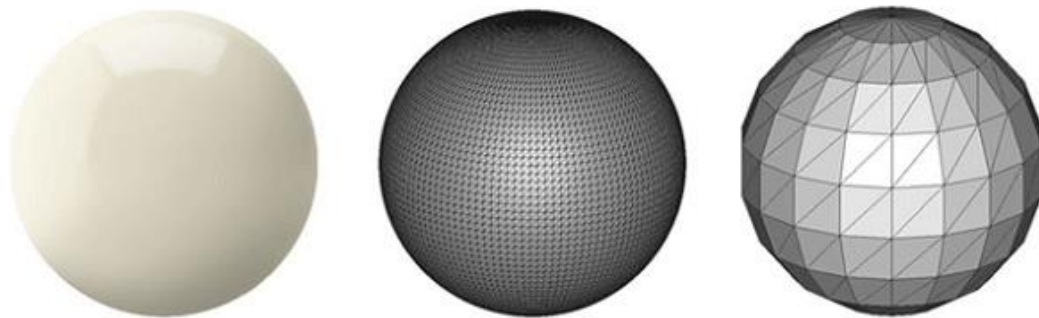


Obr. 7 Princip metody LOM [11]

V této práci se budu vzhledem k charakteru technologie a jejímu rozšíření primárně zabývat metodou FDM.

### 1.3 Postup výroby pomocí 3D tisku

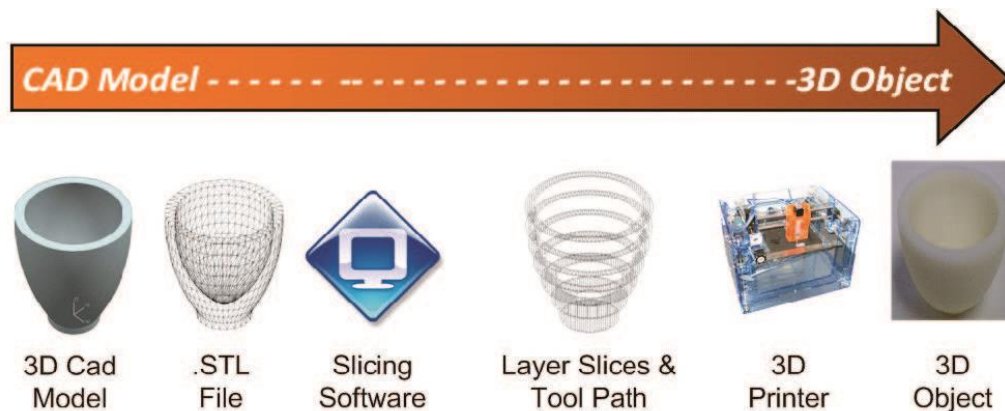
- 1) CAD model – základním stavebním kamenem procesu 3D tisku je tvorba modelu, který chceme tisknout. Tento model můžeme vytvořit ve specializovaném CAD softwaru (Inventor, Solidworks, Fusion360 atd.). Tvorba vlastního modelu je v dnešní době nejpobulárnější, stále více se však také v určitých případech užívá tzv. reverzní inženýrství. Touto metodou lze pomocí detailních skenerů naskenovat určitý již existující objekt a následně pomocí pokročilého softwaru získat velmi přesný "mrak bodů", symbolizující jeho tvar. Tato metoda je v dnešní době často užívána například v medicíně či archeologii.
- 2) STL soubor – vytvořený CAD model bohužel nelze přímo využít při slicování, je nutné jej převést do vhodného formátu. Tímto formátem je formát STL (Standard Triangle Language). Jedná se o stereolitografický formát, vyvinutý pro použití u metody SLA, dnes je však využíván i u jiných metod 3D tisku. Jeho principem je geometrická reprezentace navrženého modelu pomocí trojúhelníkových segmentů, viditelná na Obr. 8. Nepracuje však s detaily, jakými jsou například textura či barva povrchu. Logicky tedy vyplývá, že větší přesnosti lze dosáhnout vygenerováním většího množství menších segmentů, negativem je však delší doba generování a větší zátěž pro výpočetní výkon zařízení.



Obr. 8 Zobrazení koule ve formátu STL [12]

- 3) Slicer – jak již bylo zmíněno, základní myšlenkou 3D tisku je postupné pokládání materiálu po vrstvách. Slicer je program, převádějící model ve formátu STL do textového souboru, který se nazývá G-kód. Tento soubor poté samotné tiskárně dává instrukce ohledně drah a rozvrstvení, nastavují se zde však i důležité parametry, které 3D tisk ovlivňují, jako například teplota tavení filamentu, rychlost tisku, hustota výplně (infill), orientace drah (rastru), výška vrstvy a další. Nejpoužívanějšími Slicery pro "hobby" uživatele jsou PrusaSlicer, Simplify3D a Ultimaker Cura.

- 4) Tisk – před tiskem je důležité správně nastavit a nakalibrovat tiskárnu, jinak může dojít např. k nesprávnému uchycení první vrstvy. Následný proces tisku je automatický, není třeba žádného průběžného zásahu. Důležitým faktem je také správné napolohování dílu ve Sliceru, jelikož u některých složitých tvarů, např. převisů, je třeba souběžně s dílem vytisknout podpěry, jejich minimalizace a optimalizace polohy je žádoucí.
- 5) Dokončovací operace – po procesu tisku přichází na řadu postprocessing – dokončovací operace. Jednou z těchto operací je odstranění vzniklých podpor. Podpory mohou být vytisknuté z totožného materiálu jako samotný díl, v tom případě je třeba jejich mechanického odstranění, např. ulomením, mohou být však vytisknuté i ze speciálního filamentu, např. BVOH, který se po ponoření do vody sám rozpustí. U mechanického odstranění je třeba brát zřetel na zhoršení jakosti povrchu. Vytisknutý díl je možné následně dále upravovat, například vyhlazením povrchu či nabarvením.

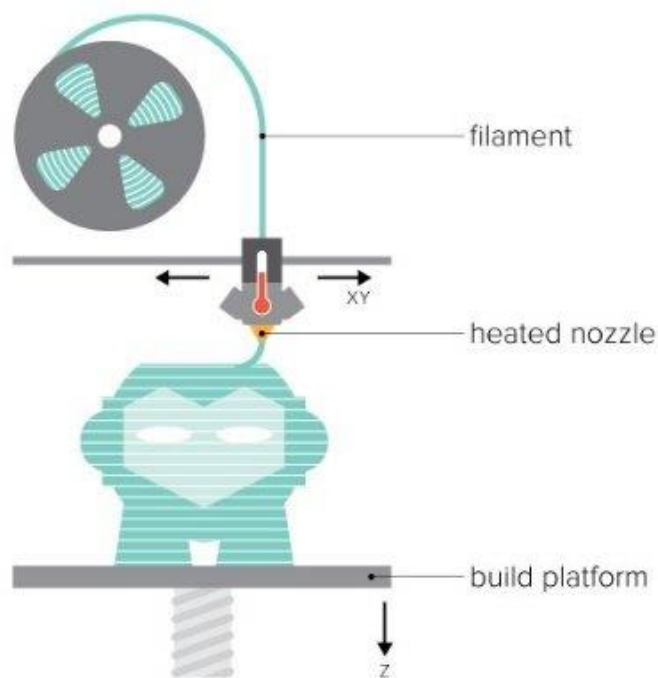


Obr. 9 Princip výroby pomocí technologie 3D tisku [13]

## 1.4 FDM tisk

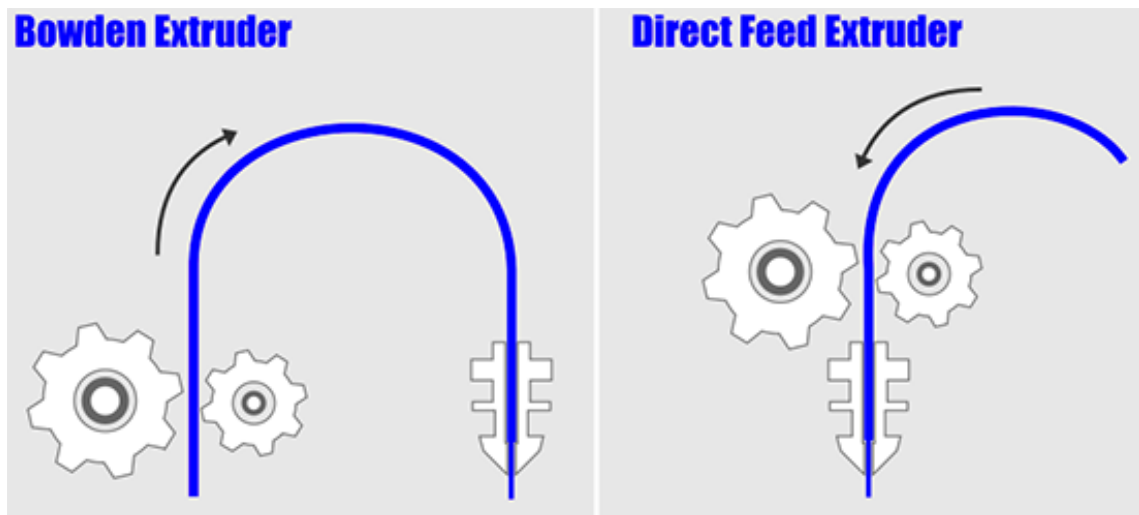
Nejvyužívanější metodou 3D tisku je technologie FDM. Principem této metody je tavení materiálu a jeho následné nanášení na tiskovou podložku dle principu layer-by-layer (vrstva po vrstvě). Použitý materiál je reprezentován navinutou strunou o daném průměru, na který je 3D tiskárna uzpůsobena. V dnešní době je běžným průměrem struny 1,75 mm. Tato struna je následně zpracovávána v "srdci" celé FDM tiskárny, a to tiskové hlavě (viz Obr. 10). Tiskovou hlavu tvoří dvě základní části, a to část studená a část horká. Funkce studené části spočívá v dávkování materiálu a jeho posuvu pomocí krokového motoru. Horká část tiskové hlavy slouží k natavení vstupního materiálu při přesně dané teplotě. Tato tavenina je poté pomocí trysky vytlačována ven z tiskové hlavy. Studená část neboli extruder

je na trh dodávána ve dvou základních variantách, kterými jsou systém Bowden a systém přímého podávání. Rozdíl mezi těmito systémy spočívá v poloze a návaznosti studené a horké části. Zatímco u přímého extruderu jsou tyto části spojeny, u systému Bowden je podavací mechanismus oddělen. 3D tiskárna s přímým podáváním dosahuje větší flexibility z hlediska užitých materiálů a kvalitnější extruze, avšak přímé spojení studené a horké části značně navýší hmotnost tiskové hlavy, tento fakt může ovlivnit přesnost tisku. Oba systémy jsou viditelné na Obr. 11. [14,15]



Obr. 10 Schéma metody FDM [16]

Komplexní sestavou dílů v tiskové hlavě je tzv. hotend, který se krom tavení vstupního materiálu také stará o jeho chlazení. Chlazení probíhá ve vrchní části hotendu, zatímco tepelná komora se nachází v jeho spodní části, až u samotné výstupní trysky. Tento fakt je velice důležitý, neboť bez efektivního chlazení by docházelo k nežádoucí expanzi materiálu směrem vzhůru a následně ke snadnému ucpání hotendu. Krom žebrovaného chladiče (heat sink) je u teplotně náročnějších materiálů využíván i ventilátor, který tento chladič ještě pomocí proudu vzduchu dochlazuje. Poslední a nejspodnější částí hotendu je výstupní tryska. Tryska je vyráběná z teplotně odolných materiálů, vyskytuje se v několika variantách v závislosti na průměru a aplikaci. [17]

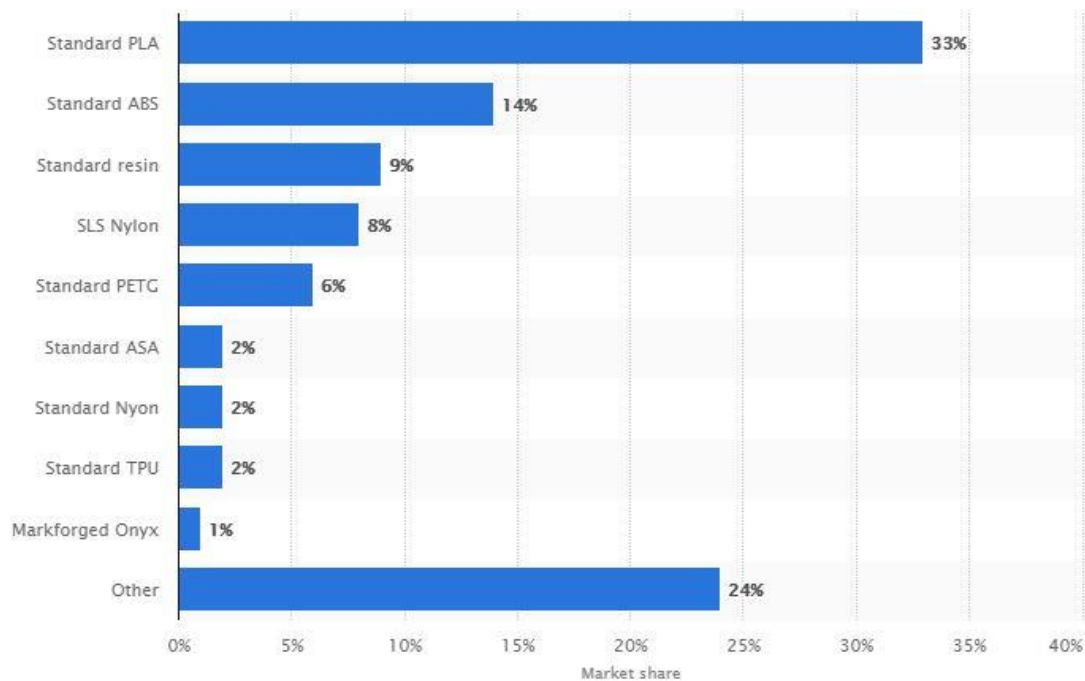


Obr. 11 Porovnání přímého extrudéru a systému Bowden [17]

Materiál je po natavení vytlačován na tiskovou podložku. Zásadním aspektem 3D tisku je přilepení první tiskové vrstvy na tuto podložku. Pokud by se tak nestalo, došlo by k porušení návaznosti dalších vrstev. Na tiskové podložky se využívá vícero materiálů, například sklo či povrch PEI (polyetherimid). Tiskové podložky s PEI lze také nahřívat, tento fakt ovlivní adhezní vlastnosti, jelikož se tisknutý materiál s podložkou lépe spojí. Je však nutné zvolit optimální teplotu podložky, aby se tisknutý výrobek k podložce naopak nepřilepil až příliš a nebylo nutné jej poté s rizikem poškození povrchu podložky odlamovat. [17]

## 1.5 Materiály pro FDM tisk

V dnešní době již existuje značné množství rozdílných polymerních materiálů užívaných při FDM tisku. Přes narůstající oblíbenost tisku kovů nebo keramiky je tisk polymerních materiálů stále světově nejrozšířenějším. Volba materiálu závisí na rozdílných faktorech, jakými jsou např. cena, mechanické vlastnosti, použití výrobku a další. Mezi nejvyužívanější polymerní materiály patří PLA, ABS, PET-G, Nylon, PC, ULTEM či ASA. V této práci se autor zabývá výhradně problematikou tisku PLA, proto bude detailní popis věnován pouze tomuto materiálu. Z následující statistiky (Obr. 12) z července roku 2018 je možné vidět celosvětové procentuální zastoupení polymerních materiálů pro 3D tisk a dominantní pozici PLA, která tvoří plnou třetinu veškerých výtisků.



Obr. 12 Procentuální zastoupení materiálů pro 3D tisk v roce 2018 [18]


## 1.6 PLA

PLA neboli polymléčná kyselina (Polylactic acid) je polymerní, plně rozložitelný materiál, získávaný z cukrové třtiny či kukuřičných a bramborových škrobů. Jedná se v dnešní době vedle ABS o nejpoužívanější materiál v oblasti FDM tisku. Jeho nespornými výhodami jsou nízká cena, vzhledem k nízké teplotě tavení i snadný tisk, vysoká pevnost či dobrá výsledná kvalita povrchu, který nutně nevyžaduje dokončovací operace. Oproti také hojně využívanému ABS tolik netrpí charakteristickými problémy 3D tisku, jakými jsou smršťování nebo celkově vyšší tvarová nepřesnost, není tedy bezpodmínečně nutné užití vyhřívané tiskové podložky. Lze jej tisknout i v doslova domácích podmínkách, jelikož při tisku nezapáchá. Oproti ABS či PET-G je však PLA velmi křehkým materiálem, nedoporučuje se tedy pro tisk mechanicky dlouhodobě namáhaných dílů. Některé další hodnoty mechanických vlastností lze vidět na data sheetu firmy Prusa na Obr. 14. PLA lze také do určité míry recyklovat, je však nutné počítat s postupným zhoršováním mechanických vlastností. Lanzotti et al [21] provedli komparační měření mechanických vlastností mezi recyklovaným a původním nerecyklovaným PLA. Při testu smykové pevnosti mezi vrstvami dospěli k výsledku, že 2x recyklovaný materiál si ještě dokázal udržet dobré hodnoty pevnosti, avšak dále nastal zlom a prudký pokles (viz Obr. 13). Recyklovaný materiál se však vzhledem ke svým mechanickým vlastnostem nabízí pro aplikaci při technologii vstřikování. Autoři ve své práci dokázali, že recyklace je realizovatelnou a ekologickou alternativou. [19,20,21]

| PLA filament         | Short-beam strength (MPa) |
|----------------------|---------------------------|
| Virgin               | 119.1 ± 6.6               |
| One time-recycled    | 106.8 ± 9.0               |
| Twice recycled       | 108.5 ± 9.9               |
| Three times recycled | 75.0 ± 16.2               |

Obr. 13 Hodnoty smykové pevnosti recyklovaného PLA [21]

Mezi nevýhody PLA patří náchylnost k degradaci působením UV záření a celkově nízká tepelná odolnost. Teplota skleného přechodu je velmi nízká, tudíž materiál měkne již při teplotě okolo 50-60 °C. PLA je tedy využíváno pro průmyslovou výrobu rozměrově přesných prototypů či konceptů, pro domácí výrobu různých krabiček, věšáků, sošek a dalších interiérových doplňků, využití však nachází i v medicíně. Díky svému přírodnímu původu je biokompatibilní. Jeho 100% rozložitelnost naznačuje možnost využití například pro buněčné scaffolds, kardiovaskulární implantáty či pro lékařské nástroje. [22,23]



TYPICAL MATERIAL PROPERTIES:

| Physical Properties                             | Typical Value | Method         |
|---|---------------|----------------|
| Peak Melt Temperature [°C]                      | 145-160       | ISO 11357      |
| Glass Transition Temperature [°C]               | 55-60         | ISO 11357      |
| MFR [g/10min] <sup>(1)</sup>                    | 10.4          | ISO 1133       |
| MVR [cm <sup>3</sup> /10min] <sup>(1)</sup>     | 9.4           | ISO 1133       |
| Specific Gravity [g/cm <sup>3</sup> ]           | 1.24          | ISO 1183       |
| Moisture Absorption 24 hours [%] <sup>(2)</sup> | 0.3           | Prusa Polymers |
| Moisture Absorption 7 days [%] <sup>(2)</sup>   | 0.3           | Prusa Polymers |
| Moisture Absorption 4 weeks [%] <sup>(2)</sup>  | 0.3           | Prusa Polymers |
| Heat Deflection Temperature (0,45 MPa) [°C]     | 55            | ISO 75         |
| Tensile Yield Strength Filament [MPa]           | 57.4 ± 0.4    | ISO 527-1      |

<sup>(1)</sup> 2,16 kg; 210 °C | <sup>(2)</sup> 28 °C; humidity 37 %

MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED TESTING SPECIMENS<sup>(3)</sup>:

| Property / print direction                                 | Horizontal | Vertical X,Y-Axis | Vertical Z-Axis | Method    |
|--|------------|-------------------|-----------------|-----------|
| Tensile Modulus [GPa]                                      | 2,2 ± 0,1  | 2,4 ± 0,1         | 2,3 ± 0,1       | ISO 527-1 |
| Tensile Yield Strength [MPa]                               | 50,8 ± 2,4 | 59,3 ± 1,9        | 37,6 ± 4,0      | ISO 527-1 |
| Elongation at Yield Point [%]                              | 2,9 ± 0,3  | 3,2 ± 0,1         | 1,9 ± 0,3       | ISO 527-1 |
| Impact Strength Charpy <sup>(4)</sup> [kJ/m <sup>2</sup> ] | 12,7 ± 0,7 | 13,7 ± 0,7        | 5,0 ± 1,4       | ISO 179-1 |

Obr. 14 Data sheet PLA od firmy Prusa [24]

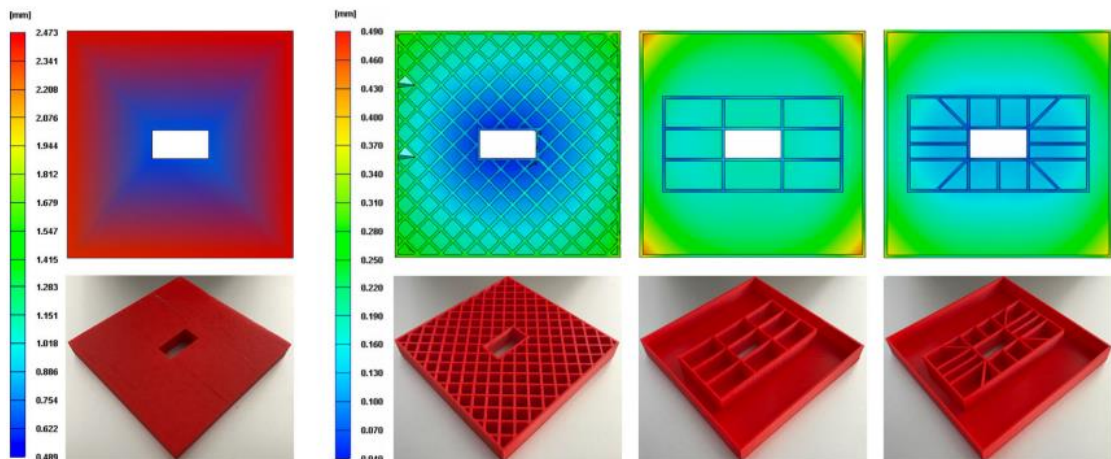
## 2 Rešerše problematiky související s tiskem PLA

### 2.1 Nejběžnější chyby při tisku z PLA

Jako u každého materiálu, i u PLA je důležitým faktorem co nejlepší rozměrová přesnost daného výtisku, například prototypového kusu. Proto jsou tyto nepřesnosti ve snaze o jejich redukci pravidelně podrobovány studiím. Je však nutno zmínit, že PLA je z hlediska chyb tisku velmi spolehlivým materiálem. Chyby a nepřesnosti jsou u PLA většinou méně významné nežli u jiných tiskových materiálů, jedná se o jeden z důvodů velké popularity PLA mezi profesionálními i domácími tiskaři. Chybovost tisku se také odvíjí od kvality samotné tiskárny, běžně dostupné levné tiskárny logicky nedosahují stejných kvalit jako profesionální tiskárny, jejichž ceny běžně přesahují několikasettisícové či milionové hodnoty.

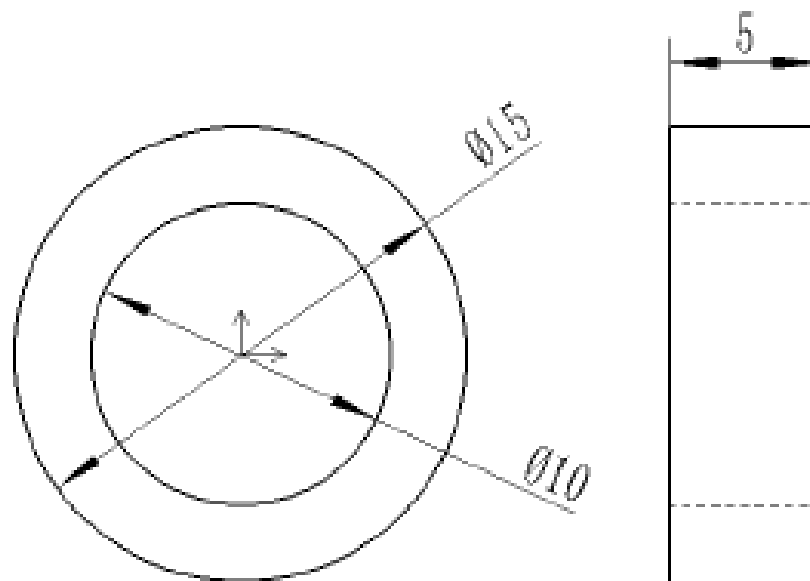
Prvním problémem, se kterým musí výrobce počítat, je smršťování výtisků. Oproti například obrábění, kde lze pro lepší chlazení použít chladicí kapalinu, u 3D tisku tuto možnost nemáme, výtisky proto prochází náhlými a velkými teplotními změnami, které mají za následek smrštění. Většímu smrštění podléhají oproti vnějším rozměrům vnitřní artefakty, primárně otvory, jejich skutečný rozměr je vždy menší než u navrhnutého modelu. Yaman [25] vypracoval studii, zabývající se touto problematikou. Zmínil, že na velikost smrštění má vliv rozdíl teplot skelného přechodu materiálu a okolí. Navrhl žebrovou strukturu, která dokáže vliv smrštění snížit, nikoliv však minimalizovat či dokonce odstranit. Tato struktura je viditelná na Obr. 15. U otvorů bez speciálních vnitřních podpůrných struktur zjistil, že úroveň smrštění se s průměrem otvoru téměř nemění. U artefaktu s větším množstvím otvorů ukázal matematický model nerovnoměrné smrštění těch otvorů, které leží na okraji nejvíce ovlivněné zóny. Posledním artefaktem dokázal, že stejný princip lze využít nejen pro kruhové, ale i obdelníkové či čtvercové otvory. [25]





Obr. 15 Analýza vnitřního pnutí a smrštění obdelnikového otvoru [25]

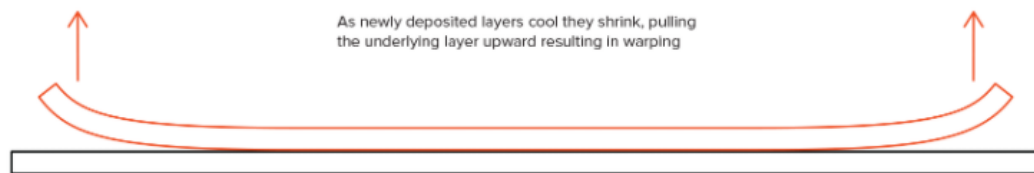
Co se týče optimálních parametrů pro minimalizaci smršťování výtisků, Zhu et al [26] provedli experiment porovnávající vícero tiskových parametrů. Zkušební vzorky ve tvaru prstence (viz Obr. 16) byly vyhotoveny za rozdílných výšek vrstvy, teplot, rychlostí tisku a také teplot tiskové podložky. Autoři dospěli k výsledkům, které ukázaly, že nejlepší kombinací parametrů pro minimalizaci vlivu smršťování je teplota tisku 210 °C, teplota tiskové podložky 45 °C, výška vrstvy 0,1 mm a rychlost tisku 45 mm/s. [26]



Obr. 16 Zkušební prstenec experimentu dle Zhu [26]

Další častou chybou tisku, úzce související se smršťováním výtisku je zakřivení, obecně nazýváno jako warping. Jak již bylo v této kapitole zmíněno, ke smršťování výtisků dochází vlivem chladnutí. Toto chladnutí však není rovnoměrné, různě velké plochy chladnou různou rychlostí a jejich rozměry se mění nerovnoměrně, může tak docházet vlivem vnitřního napětí k zakřivení nejčastěji okrajových částí výtisku (viz Obr. 17). Co se týče materiálů, warpingu podléhají všechny polymerní materiály, PLA však jen velmi málo, tento problém

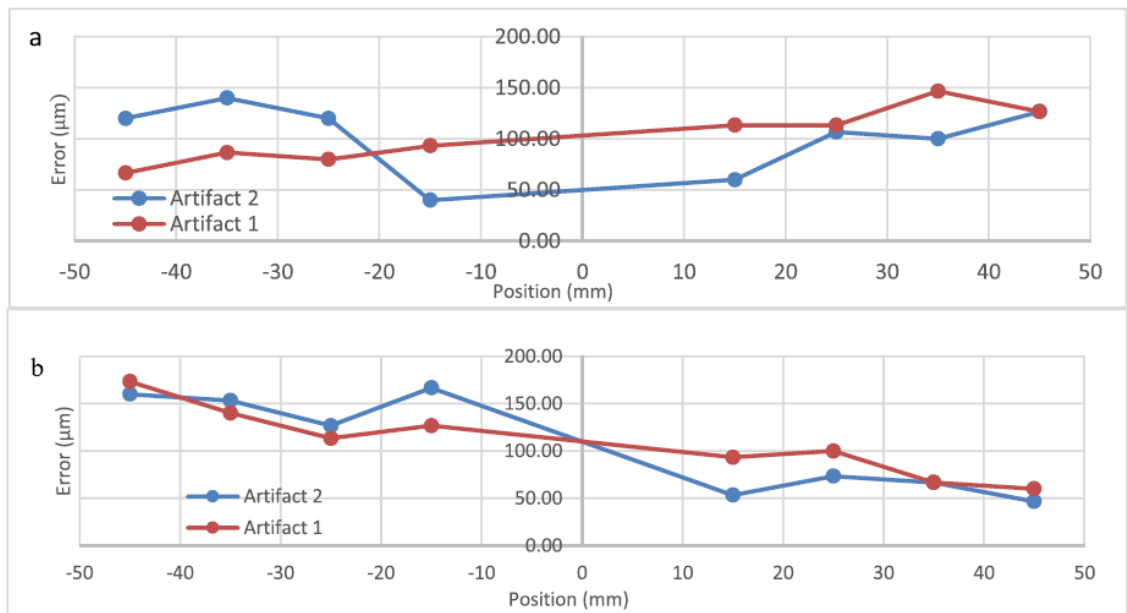
je signifikantnější například u ABS, které disponuje vyšší teplotou skelného přechodu a hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti. Warpingu můžeme předejít důslednou kontrolou teplot během tisku či zvýšením adheze tiskové podložky, díky které nedojde k odtržení první vrstvy a tvorbě zakřivení. Z hlediska konstruktéra se lze warpingu do určité míry vyvarovat užitím zaoblených rohů místo ostrých či maximální redukcí velkých jednolitých ploch. [27]



Obr. 17 Schematické zakřivení okrajů [27]

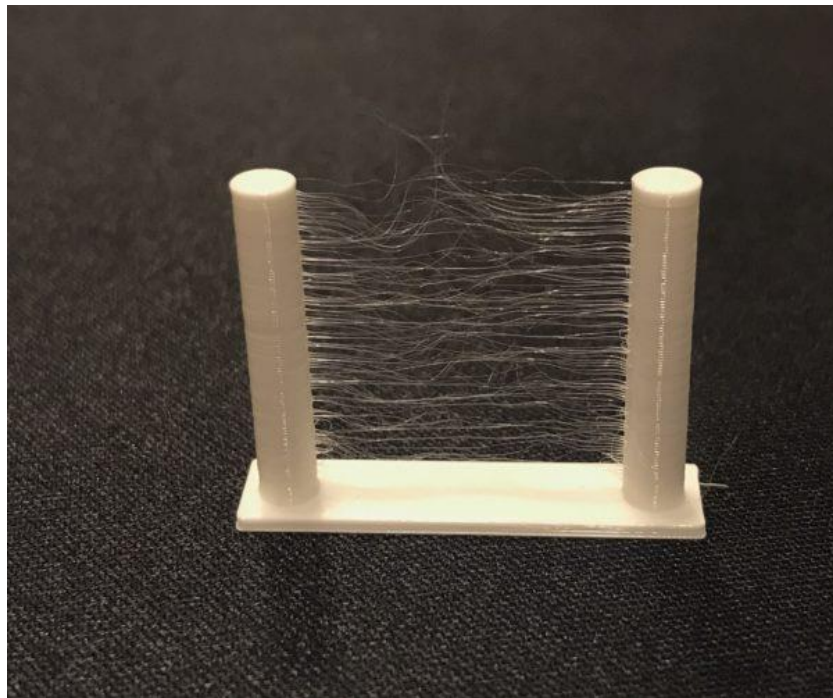
Nejběžnějším problémem u tisku PLA je špatná adheze první tiskové vrstvy. Tato vrstva má zásadní vliv na výsledek a kvalitu celého tisku. Tato chyba je způsobena primárně špatným nastavením tiskových podmínek. Optimální přilnavosti PLA dosáhneme důkladným vyčištěním tiskové podložky od mastnoty, aplikací lepidla, snížením rychlosti tisku či zvýšením teploty. Nejedná se však pouze o teplotu tavení filamentu, zásadní roli zde může hrát také teplota podložky. I když je při správném použití možné tisknout PLA i bez vyhřívané podložky, doporučením pro správnou adhezi první vrstvy je zahřátí tiskové podložky na teplotu okolo 60 °C. [28]

Narozdíl od vnitřních otvorů, u tisknutých výstupků či obecně vnějších struktur konstantně pozorujeme rozměrovou odchylku v kladném směru neboli že tyto výstupky jsou vždy větší oproti nominální hodnotě uvedené v modelu. Syrlybayev et al [29] ve své práci o vlivu teploty extruze na přesnost tisku tento trend ověřili a graficky znázornili. Vytvořili dva totožné zkušební artefakty, mimo jiné obsahující řadu válcových výstupků. Každý z těchto artefaktů byl tisknut za odlišných teplot a výšek vrstvy. První artefakt byl vytisknut za teploty 230 °C a výšky vrstvy 0,2 mm, druhý za teploty 200 °C a výšky vrstvy 0,15 mm. Jejich experiment ukázal konstantní rozměrovou nepřesnost v kladných hodnotách u obou artefaktů, viditelnou na Obr. 18. Tabulka A značila tiskovou orientaci v ose X, tabulka B v ose Y. Potvrdili tedy teorii, že tento jev je nezávislý na zvolených parametrech, lze jimi velikost této odchylky do určité míry pouze korigovat. [29]



Obr. 18 Grafické znázornění rozměrových odchylek válcovitých výstupků v osách X a Y [29]

Častým problémem je kromě rozměrových nepřesností či problémy s adhezí také tzv. stringování. Tyto drobné nitky se tvoří nejčastěji při přejezdu tiskové hlavy, kdy nedochází k extruzi a filament je "vtahován" zpět do tiskové hlavy, není však dokonale zchlazen, proto dochází k jeho drobnému vytékání, jak je možné vidět na Obr. 19. Tento problém lze u PLA do určité míry eliminovat snížením teploty tisku či zvýšením rychlosti a vzdálenosti retrakce. [30]



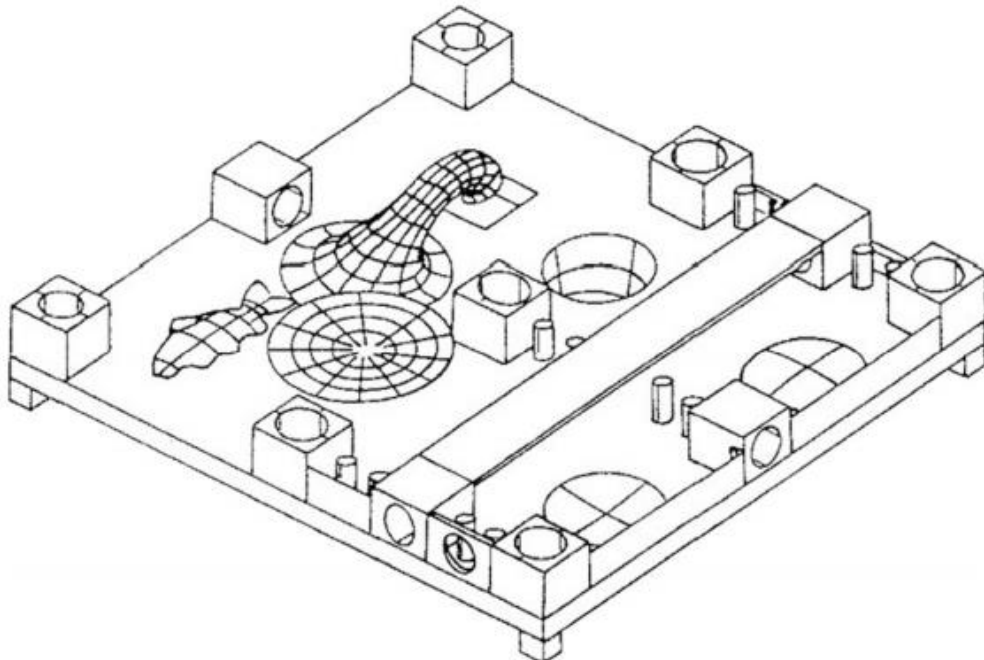
Obr. 19 Stringování [31]

## 2.2 Zkušební artefakty pro 3D tisk

Zkušební artefakty jsou tělesa, sloužící k porovnání tiskáren či materiálů pro 3D tisk pomocí specifických struktur a tvarů, které ověřují problematická místa a parametry 3D tisku, například geometrickou přesnost, schopnost opakovaného tisku totožného elementu s totožným výsledkem či test detailního tisku.

Historie zkušebních artefaktů sahá do roku 1991, kdy Jean-Pierre Kruth navrhl první artefakt, jehož úkolem bylo porovnání různých metod aditivní výroby (SLA, SLS, LOM). Jednalo se o strukturu o přibližném tvaru písmena U, obsahující různé geometrické útvary, jako například duté válce, rovnou a skloněnou plochu, malé čtvercové útvary a další. Každý z těchto útvarů byl na artefaktu zastoupen pouze jednou, nedala se zde tedy testovat opakovatelnost. [32]

Prvním artefaktem, schopným testovat opakovatelnost dané metody aditivní výroby, se v roce 1994 stal artefakt Childse a Justera (viz Obr. 20). Tento artefakt se kromě metod uvedených u Krutha rozšířil i o testování metody FDM. Opakované elementy byly také například rozdílně dimenzované, problematickým místem artefaktu se však stala složitá tvarová "mostová" plocha, která se velice obtížně měřila a díky svému tvaru v podstatě téměř garantovala výrazné zdeformování. [33]



Obr. 20 Zkušební artefakt navržený Childsem a Justerem [33]

Jayram et al [34] ve spolupráci s firmou Ford ve své práci z roku 1994 jako první nastínilí užití standardizace a normování pro užití zkušebních artefaktů. Sami navrhli artefakt, který je oproti ostatním jednodušší, obsahuje pouze různě dimenzované válce, kuželový útvar a hranolovité segmenty, připomínající schody. Tento artefakt tedy dokázal odhalit potenciálně problematické parametry tisku, jakými jsou například zachování rovinnosti, tisk strmých stěn či schopnost přesného tisku hrotu kužele i při velmi jednoduché finální analýze. Kromě těchto parametrů, ovlivňujících kvalitu výsledného dílu, se také braly v potaz odlišné, avšak neméně důležité parametry, jakými jsou například čas tisku či možné problémy tiskárny během tiskového procesu. [35]

U dnešních zkušebních artefaktů existuje obrovská variabilita různých tvarů i velikostí. Nejčastěji užívanými tvary jsou čtvercové a obdelníkové segmenty, dále poté velmi často užívané obdelníkové či kruhové otvory, kuželové segmenty, tenké stěny a naopak "zářezy", nebo také různé přemostění, oblouky a ve speciálních případech také složité tvarové plochy. Pomocí přesných laserových scannerů či výpočetní tomografie lze tyto artefakty zkoumat do nejmenšího detailu a porovnat rozměrové nepřesnosti oproti původnímu CAD modelu. [33,35]

Co se týče použití zkušebních artefaktů u hobby tiskáren, v dnešní době existuje řada oblíbených artefaktů, které ověřují přesnost a kvalitu 3D tisku. Tyto specifické artefakty často nemají typický tvar čtvercové či obdelníkové destičky s rozmístěnými elementy, ale přímo tvar určitého objektu nebo přímo modelu. Oblíbenost těchto artefaktů spočívá často v tom, že kombinují užité vlastnosti s estetickými.

V dnešní době je nejoblíbenějším zkušebním artefaktem v oblasti hobby 3D tisku artefakt 3DBenchy navržený švédskou společností Creative Tools. Jedná se o model lodičky o rozměrech 60x31x48 mm. Tento model, viditelný na Obr. 21, však na první pohled vůbec nepřipomíná testovací artefakt, ale při bližším prozkoumání je patrné, že obsahuje komplexní možnosti otestování procesu 3D tisku. Trup lodičky otestuje schopnost tisku s velkým sklonem, kajuta s komínem otestuje tisk přemostění a rozměrovou přesnost, zadní část naopak vliv deformace při smrštění. Model také za pomoci písma na jeho spodní straně otestuje schopnost detailního tisku. Další výhodou je kromě komplexního testu i velikosti artefaktu, vzhledem ke svým malým rozměrům zabere jeho tisk při užití výšky vrstvy 0,2 mm v tiskovém módu Quality necelé 2 hodiny. [36]



Obr. 21 Zkušební artefakt 3DBenchy [36]

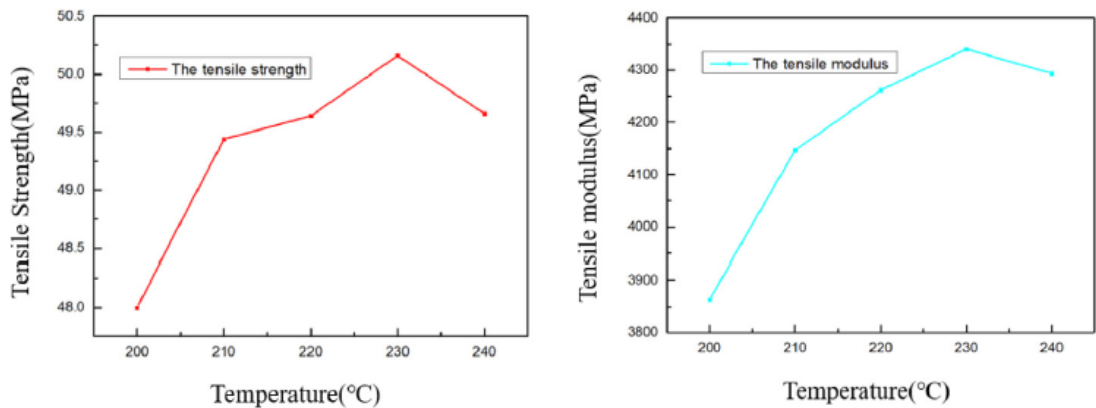
## 2.3 Vliv parametrů na 3D tisk z PLA

Zásadním vlivem na výsledek procesu FDM tisku mají vstupní parametry. Jejich vhodné použití může výrazně ušetřit čas nutný pro tisk, ovlivnit výslednou kvalitu vytisknutého povrchu či specifikovat vhodnost vstupního materiálu. V případě této práce je přihlíženo k faktu, že vstupním materiálem je pouze PLA. Při volbě vhodných parametrů se vychází kromě doporučení výrobců i ze studií zabývajících se touto problematikou. Z důvodu maximální snahy o rovnost podmínek byly však zvoleny parametry, které jsou uvedeny u všech výrobců jako vhodné a v průběhu tisku do nich není nijak zasahováno. Tyto parametry jsou popsány v následujících podkapitolách, jejichž obsah byl čerpán z vědeckých publikací a firemních podkladů:

### 2.3.1 Teplota tisku

Prvním parametrem, ovlivňujícím výslednou kvalitu a přesnost dílu, je teplota tisku. Jak již bylo zmíněno v kapitole o PLA, tento materiál disponuje nízkou teplotou tavení, je tedy z hlediska jednoduchosti a energetické náročnosti nejlepší volbou. Tang et al [37] se ve své práci touto problematikou zabývali. Testovací vzorky z PLA, vyrobené za různých teplot (200-240 °C), podrobili zkoušce tahem. Zjistili, že při teplotě tisku 230 °C disponovali vzorky nejlepšími mechanickými vlastnostmi. Mez pevnosti v tahu vzrostla oproti 200 °C o 4,3 % a modul pružnosti v tahu dokonce o 11,06 %. Mohlo by se zdát, že tento trend bude pokračovat i u teploty 240 °C, nikoliv však. Oproti 230 °C klesla mez pevnosti o 1,02 %

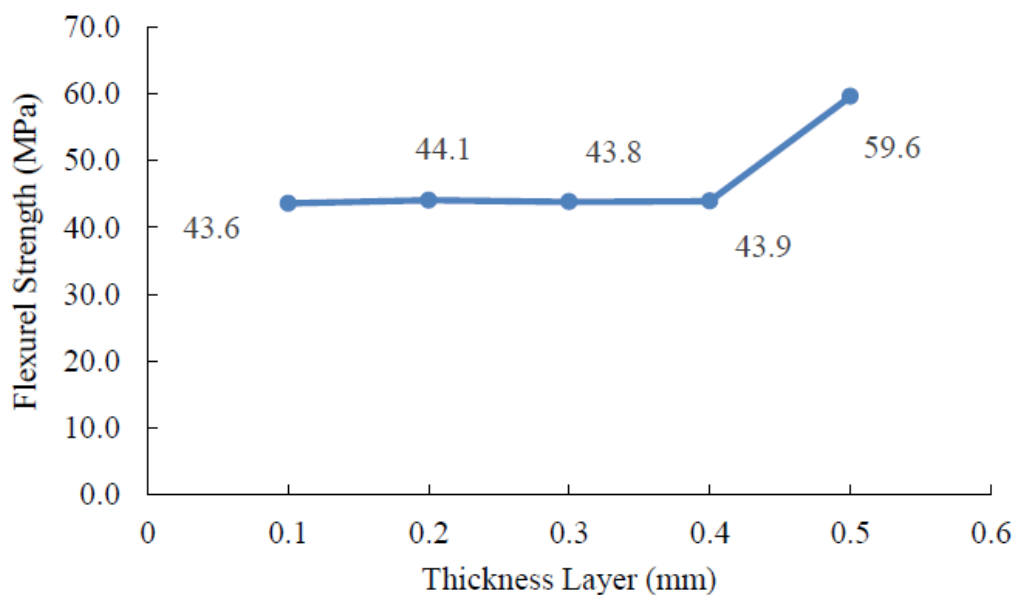
a modul pružnosti o 3,32 %. Všechny tyto vzorky byly tištěny za konstantní rychlosti tisku 30 mm/s. Maximální zjištěná hodnota meze pevnosti v tahu byla 50,16 MPa, maximální hodnota modulu pružnosti pak 4340,38 MPa (viz Obr. 22). Z tohoto článku tedy vyplývá, že nárůst teploty tisku v určitém rozmezí ovlivňuje a vylepšuje mechanické vlastnosti dílu. [37]



Obr. 22 Závislost velikosti meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu na teplotě tisku [37]

### 2.3.2 Výška vrstvy

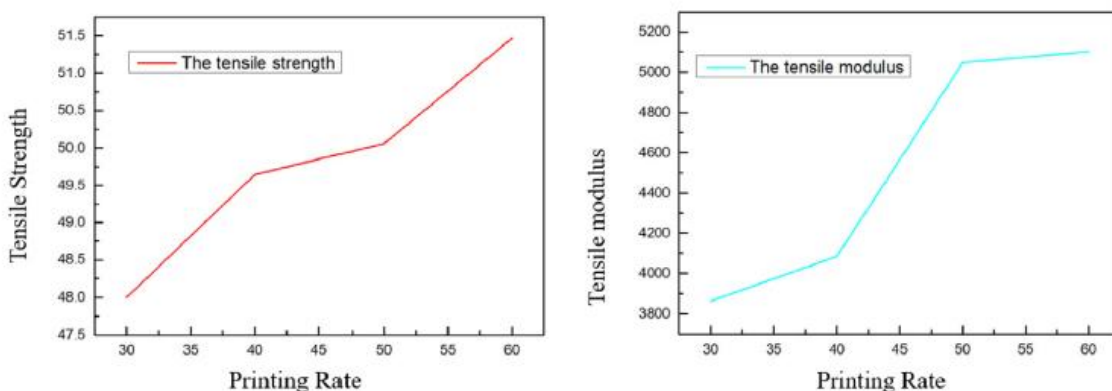
Výška vrstvy ovlivňuje u FDM tisku řadu faktorů, například rozměrovou přesnost či jakost výsledného povrchu, má však také vliv na mechanické vlastnosti. Nugroho et al [38] provedli experiment, ve kterém vyhotovili celkem 25 vzorků (5x5) s pěti různými výškami vrstvy (0,1-0,5 mm), určených pro zkoušku ohybem. Z důvodů lepší tažnosti a houževnatosti byl pro tyto vzorky použit rastr vrstev v orientaci -45/45°. Mez pevnosti dosáhla nejvyšší hodnoty 59,6 MPa u největší výšky vrstvy, avšak v rozmezí 0,1-0,4 mm se hodnoty téměř nelišily (rozmezí 43,6-44,1 MPa), jen mezi hodnotami 0,2-0,3 mm došlo k nepatrnému poklesu, tento jev je znázorněn na Obr. 23. Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v ohybu dosáhla výška vrstvy 0,3 mm, nejnižší pak 0,2 mm. Tento experiment ukázal, že v kombinaci s křížovým rastrem -45/45° bylo při užití výšky vrstvy 0,5 mm dosaženo nejlepších hodnot ohybových vlastností, důvodem může být lepší propojení vytištěného materiálu. Při volbě výšky vrstvy však musí výrobce počítat i s dalšími vlivy, například užitím vyšší vrstvy naopak snižujeme rozměrovou přesnost výtisku. [38]



Obr. 23 Závislost mezi velikostí výšky vrstvy a mezi pevností v ohybu [38]

### 2.3.3 Rychlost tisku

Tang et al [37] se ve své studii kromě vlivu teploty tavení zabývali i vlivem rychlosti tisku na mechanické vlastnosti zkušebních vzorků. Zjistili, že vzorky tisknuté při konstantní teplotě 200 °C, avšak s proměnnými hodnotami rychlosti tisku (30 až 60 mm/s), vykazovaly s narůstající rychlostí tisku vyšší hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu. Při rychlosti 60 mm/s dosáhla průměrná hodnota meze pevnosti v tahu hodnoty 51,47 MPa a hodnota modulu pružnosti v tahu 5102,12 MPa, jednalo se o nárůst o 2,34 %, respektive 10,33 % oproti rychlosti tisku 30 mm/s (viz Obr. 24). Je však také vhodné zmínit, že s narůstající rychlostí tisku rostla i hodnota odchylek měření. [37]

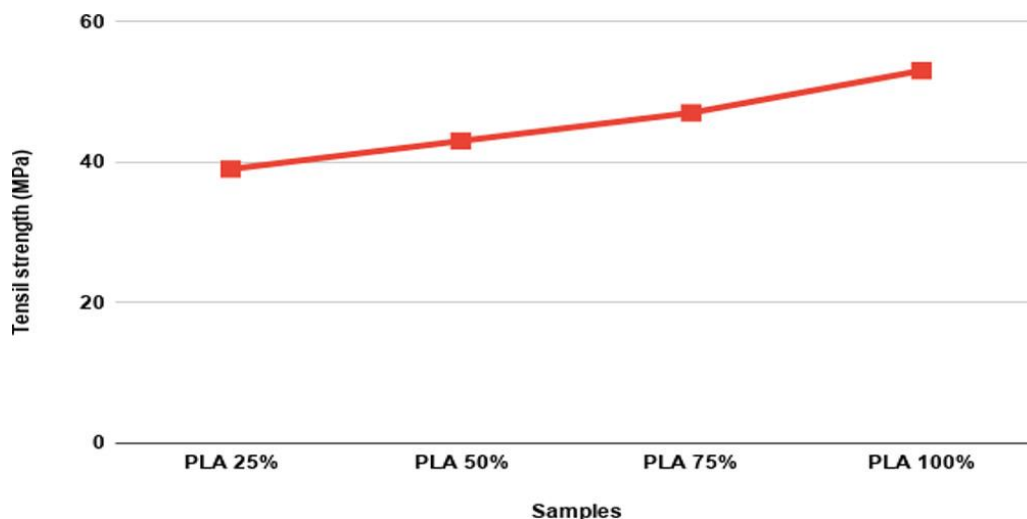


Obr. 24 Závislost meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu na rychlosti tisku [37]



### 2.3.4 Hustota výplně

Gunasekaran et al [1] ve své práci zjišťovali hodnoty mechanických vlastností v závislosti na procentuálním množství výplně (infillu). Porovnávali 4 různé typy vzorků s narůstajícím procentem výplně (25, 50, 75, 100 %) a s konstantní běžnou tiskovou orientací v ose X. Tyto vzorky následně podrobili tahové, ohybové, rázové zkoušce a také zkoušce tvrdosti dle Rockwella. Výsledné hodnoty meze pevnosti v tahu, znázorněné na Obr. 25, ověřily předpoklad autorů, že hodnoty mechanických vlastností narůstají téměř lineárně s ohledem na hustotu výplně, maximálních hodnot tedy logicky dosáhly vzorky se 100% infillem. Hodnota meze pevnosti v tahu dosáhla hodnoty 53 MPa, hodnota tvrdosti dle Rockwella hodnoty 97 HRC, hodnota meze pevnosti v ohybu také 53 MPa a hodnota rázové houževnatosti 70 J/m<sup>2</sup>. [1]

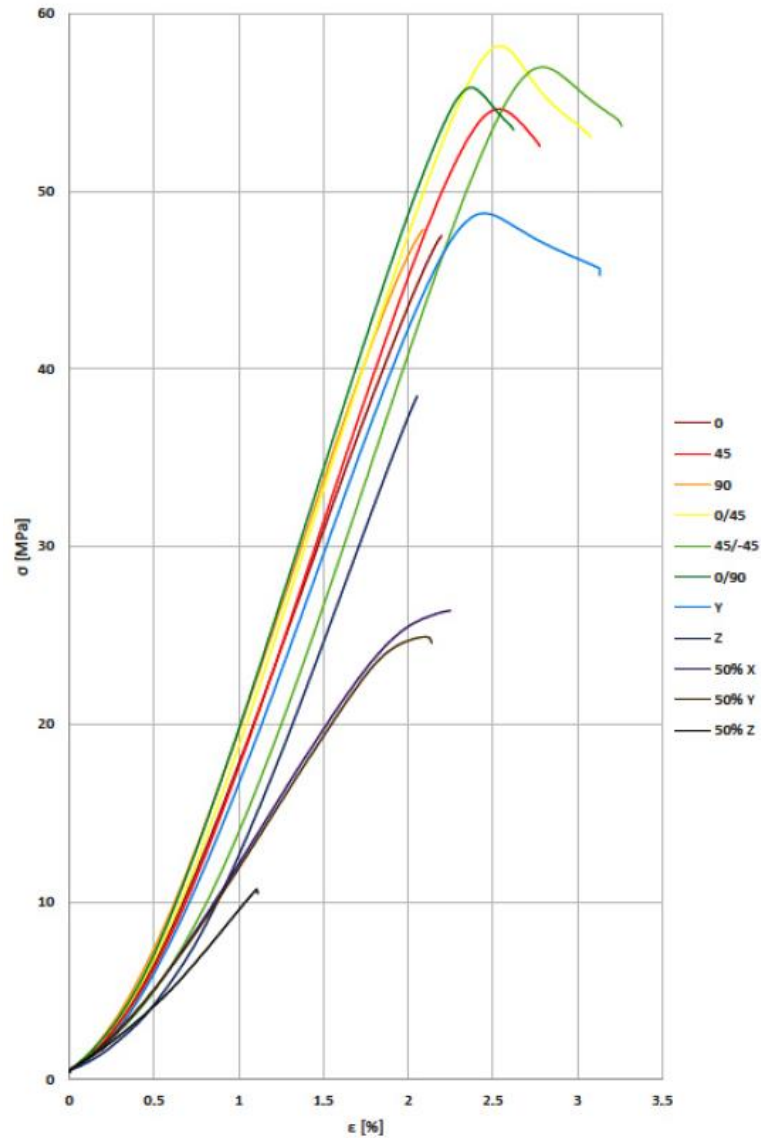


Obr. 25 Vliv hustoty výplně na hodnotu meze pevnosti v tahu [1]

### 2.3.5 Orientace modelu na tiskové podložce

Největší vliv na hodnotu mechanických vlastnosti tištěného dílu pomocí technologie FDM má samotná orientace modelu na tiskové podložce. Jelikož díly zhotovené touto technologií jsou anizotropní, rozdílná orientace dílu při tisku značně ovlivní jeho vlastnosti a chování. Hanon et al [39] tuto myšlenku podrobili zkoumání. Zkoumali vliv orientace dílu (X, Y, Z), vliv orientace rastru (0, 45, 90°) a také rozdíl mezi 100% a 50% infillem. Zaměřili se nejen na základní orientaci X, ale i na potenciální změny v jiných souřadnicích u tahové zkoušky. Z výsledků zjistili, že nejlepší orientací pro tisk se 100% infillem je osa X, avšak pro 50% infill vykazovaly osy X i Y téměř totožné hodnoty meze pevnosti v tahu, zatímco v ose Z došlo u 50% infillu k výraznému zhoršení. Oproti 100% infillu klesla hodnota meze pevnosti v tahu až čtyřnásobně. Co se týče orientace rastru, u jednoduchého rastru

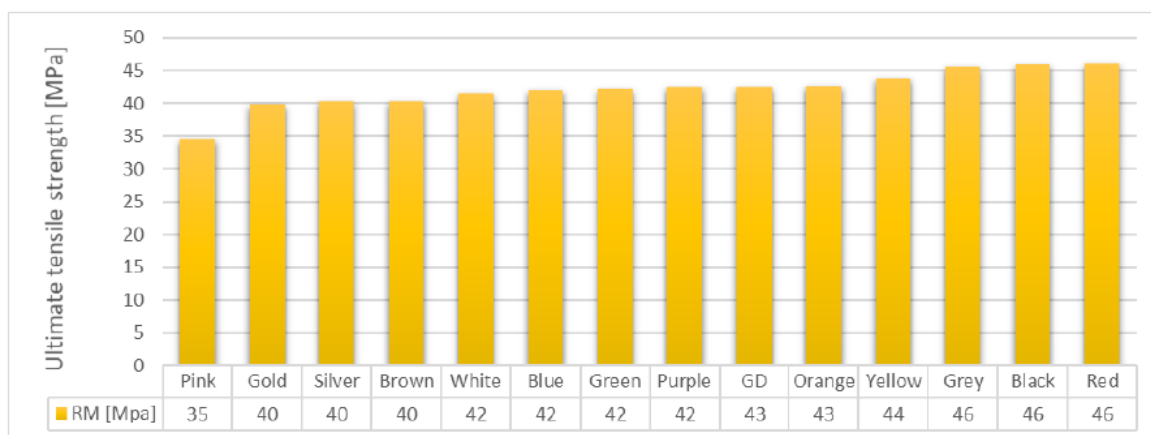
vykazovaly nejlepší hodnoty meze pevnosti v tahu hodnoty  $0^\circ$  (podélný rastr) a  $45^\circ$ . Výhodnější variantou je však volba křížového rastru  $-45/45^\circ$ , kde vlákna mezi sebou svírají úhel  $90^\circ$  a rastru  $0/45^\circ$ . Co se týče tažnosti, křížový rastr  $-45/45^\circ$  vykazoval chování houževnatého materiálu s výraznou mezí kluzu. Ostatní vzorky se chovaly jako typicky křehký materiál s neustálým nárůstem napětí až do bodu přetržení (viz Obr. 26). [39]



Obr. 26 Napěťová křivka pro vzorky s odlišnou orientací rastru (viz legenda) [39]

### 2.3.6 Barva filamentu

Na první pohled netradičním, avšak nezanedbatelným parametrem při určování mechanických vlastností PLA je barva filamentu. Pandzic et al [40] ve svém článku a experimentu zvolili filament PLA od výrobce 3D Republika ve 14 barevných provedeních a vytisknuté vzorky následně podrobili zkoušce tahem. Nejvyššími hodnotami modulu pružnosti, meze kluzu a pevnosti v tahu disponoval filament s červenou barvou, naopak nejhoršími hodnotami filament růžový (viz Obr. 27). Rozdíly mezi nejvyššími a nejnižšími hodnotami však nebyly nijak drastické, rovnaly se přibližně 20 %. Většina barev se oproti červené lišila maximálně o 10 %. Co se týče poměrného prodloužení, tak v těchto ohledech jasně dominoval růžový filament, jeho hodnota dokonce trojnásobně překonala druhý hnědý filament. Nejhorší výsledky u tohoto parametru vykázali modrý a zlatý filament s poměrným prodloužením až 15krát nižším nežli růžový filament. V této práci bude zvolena jednotná barva pro všechny filameny, a to bílá, jelikož se v uvedeném zkoumání umístila přibližně uprostřed. Není tedy zvolena barva s "extrémními" výsledky. Tato barva byla také zvolena z důvodu její dostupnosti. [40]



Obr. 27 Vliv barvy filamentu na mez pevnosti v tahu [40]

## 2.4 Analýza problému a cíl práce

V rešeršní části bylo zjištěno, že FDM tisk je v dnešní době řešeným tématem, které je podrobováno dlouhé řadě zkoumání. Velmi překvapivě se však drtivá většina experimentů soustředila na zkoumání vlivů různých parametrů tisku či porovnání různých druhů tiskových materiálů. Jelikož však existuje mnoho různých výrobců tiskových materiálů, mezi nimiž existují značné cenové rozdíly, bylo rozhodnuto o provedení zkoumání, zda-li mají tyto rozdíly nějaké opodstatnění. Výrobci však nebudou podrobeni pouze jedné zkoušce, ale komplexnímu testování, které bude zahrnovat mechanické a rozměrové zkoušky. Dále bude také zohledněna kvalita tisku. Pro experiment bylo vybráno celkem 8 výrobců, které lze snadno pořídit na českém trhu, jejich seznam se nachází v Tab. 1. Materiál PLA byl zvolen z důvodu jeho masivního rozšíření v rámci tiskařské komunity, ze stejného důvodu byla zvolena metoda tisku FDM. Jak již bylo zmíněno v podkapitole o barvách filamentu, testováno bude pouze bílé PLA, tento krok byl učiněn z důvodu dobré dostupnosti této barvy na českém trhu a také z důvodů eliminace odchylek měření při volbě jiné barvy, jelikož vědeckými články (např. Pandzic et al [40]) bylo prokázáno, že barva filamentu ovlivňuje mechanické vlastnosti.

Tab. 1 Seznam zvolených výrobců PLA filamentů

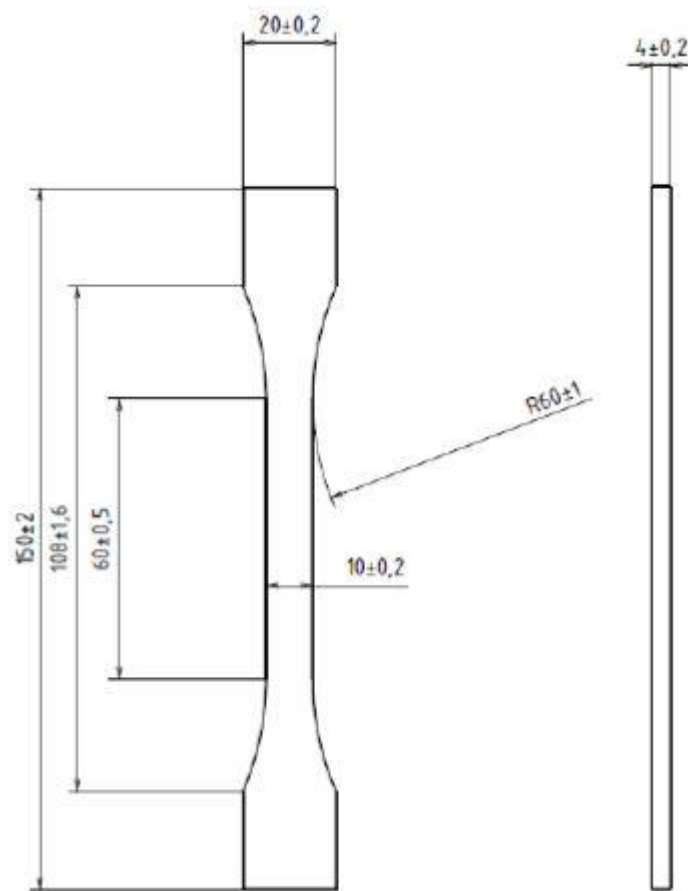
| Výrobce       | Nákupní cena<br>k 1. 5. 2021 |
|---------------|------------------------------|
| Prusament     | 599 Kč                       |
| Devil Design  | 510 Kč                       |
| Sunlu         | 361 Kč                       |
| C-Tech        | 414 Kč                       |
| Verbatim      | 631 Kč                       |
| Tronxy        | 460 Kč                       |
| Plasty Mladeč | 599 Kč                       |
| Gembird       | 441 Kč                       |

# **PRAKTICKÁ ČÁST**

# 3 Návrh metodiky testování a provedení experimentu

## 3.1 Volba vzorků

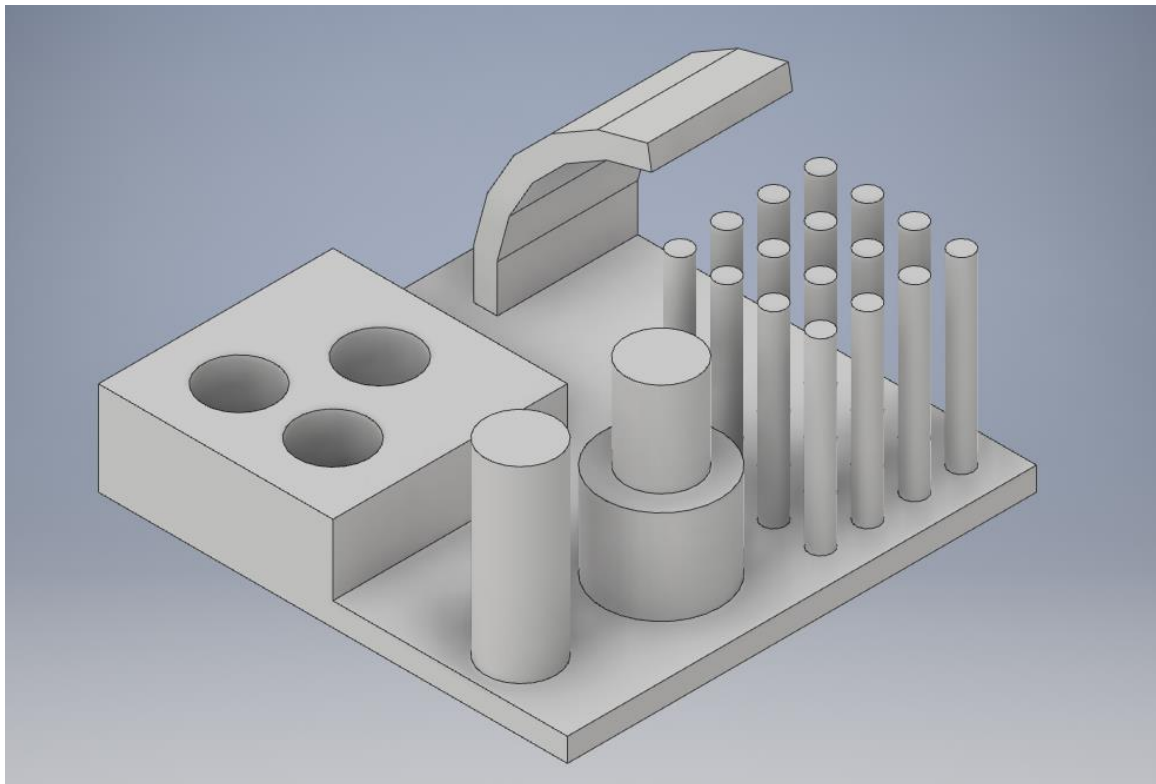
Vzorky pro tahovou zkoušku byly vybrány dle normy ČSN EN ISO 527-2 o stanovení tahových vlastností plastů. Nakonec byl zvolen vzorek s označením 1B o rozměrech 150x20x4 mm (viz Obr. 28). [41]



Obr. 28 Zkušební vzorek 1B pro tahové zkoušky plastů [42]

Co se týče volby zkušebního artefaktu, tak ten byl navržen speciálně pro tuto práci. Lze jej vidět na Obr. 29. Rozměry základní desky 100x100x5 mm odpovídají doporučení normy ISO/ASTM 52902:2019 o testovacích artefaktech pro aditivní výrobu. Artefakt obsahuje 4 oddělené části, první částí je test tisku převisů s rozsahem 0-75° a „vrstvami“ po 15°. Druhou částí je test stringování, tvořen šestnácti úzkými a vysokými válečky (piny). Třetí část je tvořena dvěma čepy, průměr jednoho z jich se v půli následně mění. Tyto čepy ověří schopnost rozměrově přesného tisku. Poslední částí je kvádr se třemi otvory. Jejich

zkoumáním se zjistí míra smršnění u jednotlivých výrobců a také jeho orientaci čili potenciální válcovitost otvorů. Tyto otvory však nemají jednotné rozměry, nýbrž jsou odsazeny po 0,1 mm (15,1 – 15,3 mm). Toto rozmezí poslouží jako test sestavitelnosti, jelikož se jeden z čepů (průměr 15 mm) odřeže a subjektivně se tato sestavitelnost otestuje.

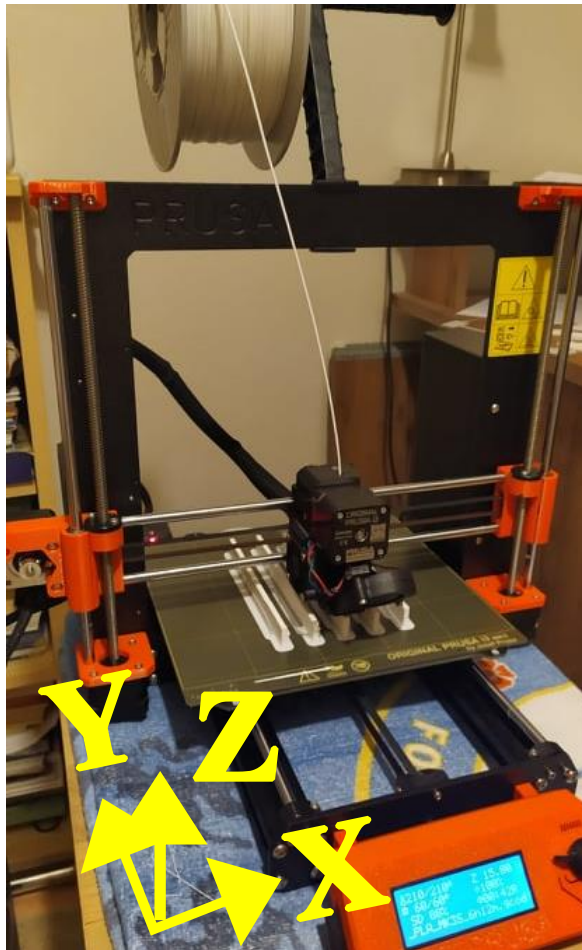


Obr. 29 Model zkušebního artefaktu

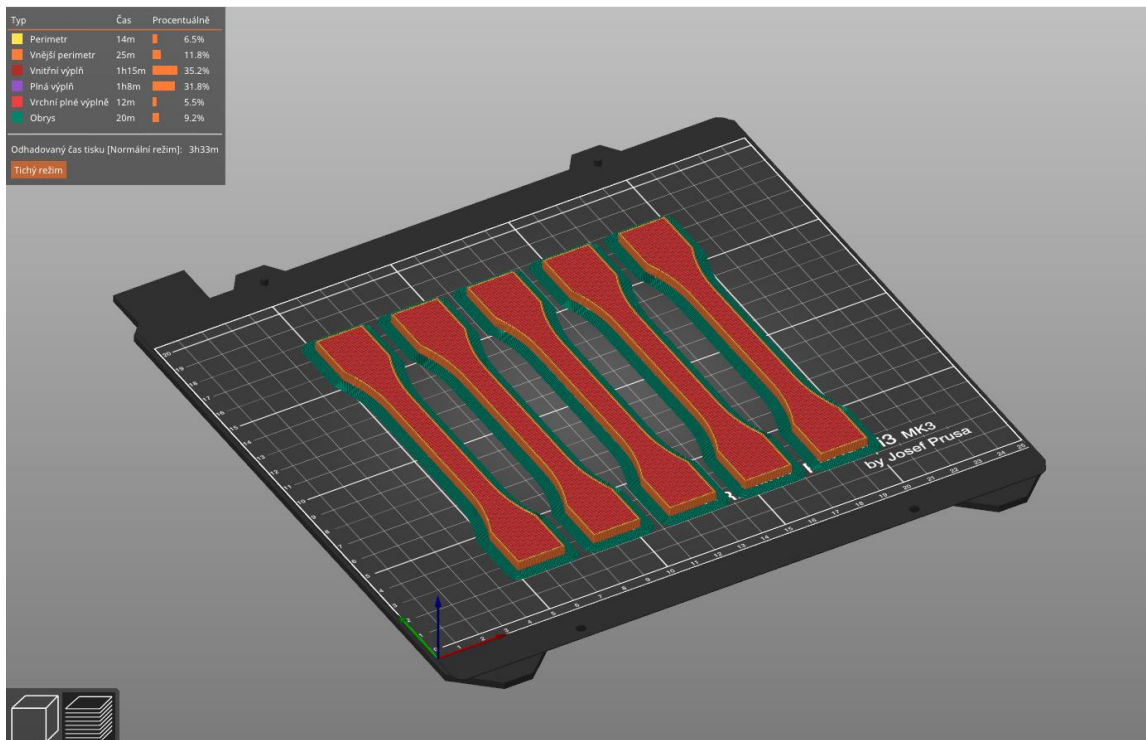
### 3.2 Tisk vzorků

Veškeré vzorky byly tištěny pomocí tiskárny Original Prusa i3 MK3S+ od firmy Prusa Research. Tisk probíhal v ustálených podmínkách při rozmezí teplot 23-24 °C a vlhkosti vzduchu 55-60 %. Všechny tři tiskové orientace dle os (X, Y, Z) byly tištěny po pěti kusech, u každého výrobce bylo tedy vytištěno celkem 15 vzorků a jeden artefakt.

Co se týče parametrů, cílem byl tisk vzorků pomocí základního nastavení programu PrusaSlicer a pro začínajícího tiskaře snadno a přehledně nastavitelné 100% výplně. Vzorky byly umístěny separátně dle orientace do prostředí Sliceru a pomocí funkce Uspořádat rozvrstveny po podložce. Všechny výtisky byly uspořádány rovnoběžně s osou Y tiskárny (osou pohybu tiskové podložky viz Obr. 30). Testovací výtisky však ukázaly, že pro bezchybný tisk bylo potřeba dodatečných úprav tiskových parametrů.



Obr. 30 Tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ s naznačením základního souřadnicového systému



Obr. 31 Vzorky v ose X v prostředí PrusaSliceru



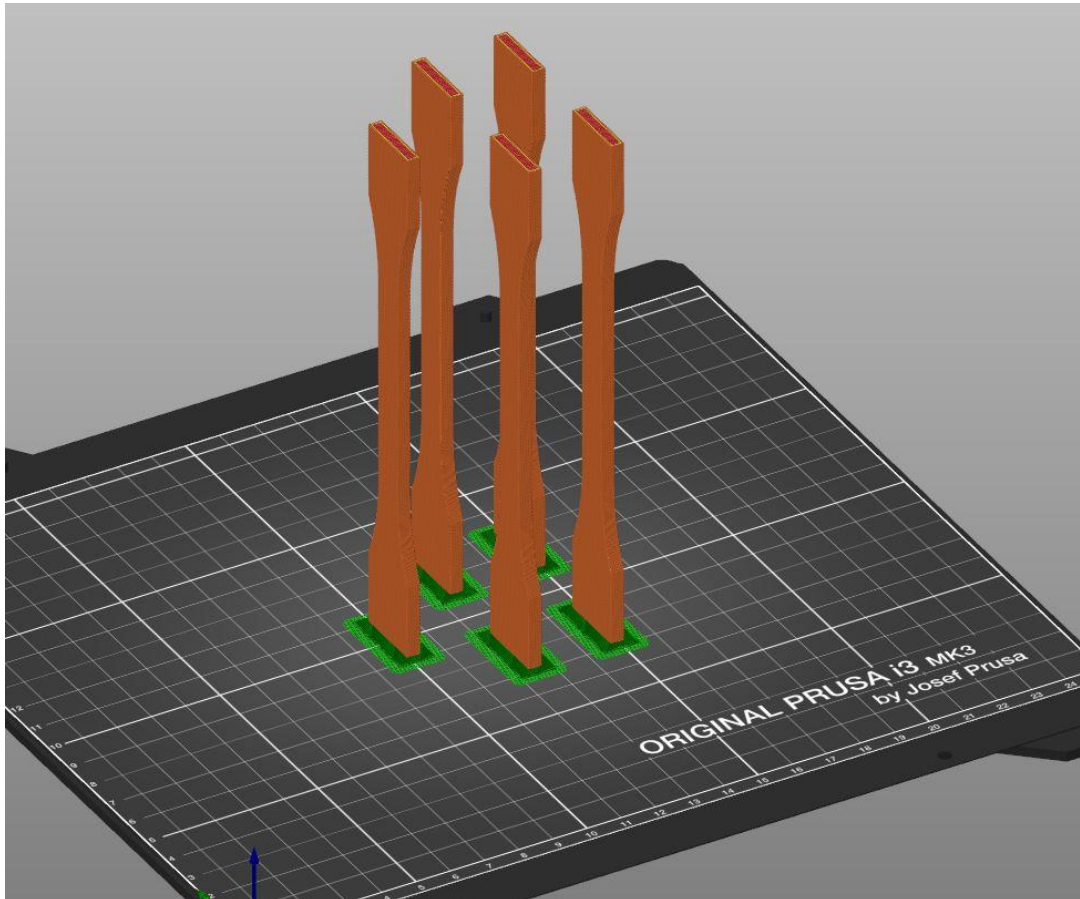
Jako nejproblematictější orientace se ukázala osa Z, která trpěla hned několika problémy. Malá styčná plocha vysokého a úzkého vzorku způsobovala i přes pečlivé čištění podložky 99% isopropylalkoholem a následně i jarovou vodou jeho odlepování od podložky. Dalším problémem bylo tření trysky o výtisk, které ve vyšších vrstvách způsobovalo vzhledem k nevhodné geometrii výtisku jeho značné rozkývání a následné poškození vlivem přílišně nahromaděného materiálu. Toto poškození, viditelné na Obr. 32, probíhalo dvěma různými způsoby, jedním bylo zadrhnutí trysky o takovýto "blob", po němž následovalo okamžité násilné stržení výtisku z podložky, druhou možností bylo znatelné posunutí vrstev a kompletní degradace výtisku.



Obr. 32 Poškozený vzorek v ose Z

Problém s adhezí mělo vyřešit použití límce neboli úzkého pruhu materiálu kolem tělesa u první vrstvy, který má za úkol zlepšit adhezi první vrstvy a stabilitu výtisku. Ani límec se však u orientace v ose Z příliš neosvědčil, v některých případech nepůsobil jednotným dojmem s první vrstvou výtisku a tím tedy postrádal svůj smysl. Jako řešení se nakonec ukázala aplikace tří vrstev raftu (viz Obr. 33), které výtisk dostatečně stabilizovaly. Raftem rozumíme podpůrnou vícevrstvou strukturu, která se vytiskne pod samotným modelem, ten

je na ní následně tištěn. Získáme tedy velmi efektní a přilnavou „mezivrstvu“ mezi výtiskem a tiskovou podložkou, která se následně ze samotného výtisku snadno odstraní. Co se týče problémů se zachytáváním trysky, po opakovaných neúspěších se změnami rychlosti, akcelerací, retrakcí či úpravou výšky umístění první vrstvy na podložku (Live adjust Z) se jako nejlepší řešení ukázalo snížení hodnoty multiplikátoru extruze na hodnotu 0,95, který toto drobné přeextrudování eliminoval. Pro zachování autentičnosti a přesnosti měření však bylo nutné použití této snížené hodnoty multiplikátoru extruze i pro vzorky v osách X a Y.

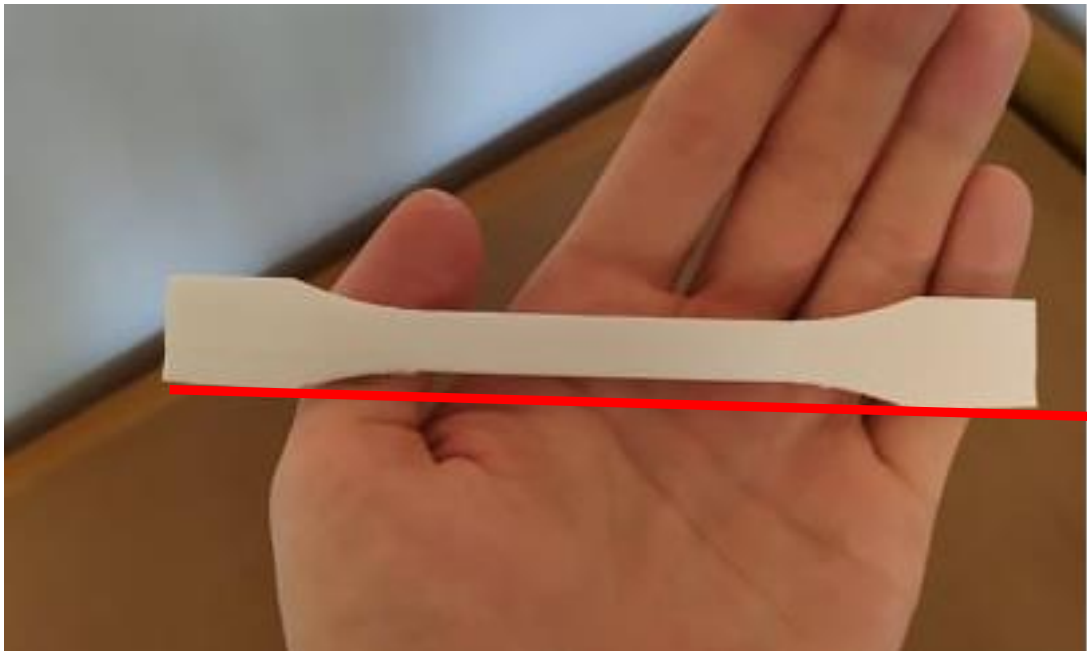


Obr. 33 Vzorky v ose Z s přidaným raftem

Nejznatelnějším problémem při tisku vzorků v ose Y se základním nastavením Sliceru byla absence podpor. Jelikož je součástí těchto vzorků znatelný převis, přecházející volně do přemostění, docházelo vlivem stažení při chladnutí výtisku k ohýbání převislé části směrem nahoru a při tisku přemostění k její kolizi s tryskou a následnému stržení celého výtisku z podložky. Po aplikaci podpor tento problém zcela vymizel, avšak z důvodu jejich špatného odstraňování byla upravena jejich vzdálenost od výtisku z 0,1 mm na 0,2 mm.

Vzorky v osách X a Y a rovněž artefakt trpěly potížemi se smršťováním a chladnutím výtisku, označovanými jako warping. Často docházelo k pokroucení rohů výtisku, které se zdeformovaly a odlepily od tiskové podložky. V těchto případech se však, narozdíl od osy

Z, osvědčilo užití 5 mm širokého límce. Jeden takový vzorek je možné vidět na Obr. 34, červená čára symbolizuje ideální rovinu tiskové podložky.



Obr. 34 Vzorek v ose Y poškozený warpingem

Výsledkem tedy byl tisk vzorků s následujícími základními parametry (viz Tab. 2):

Tab. 2 Zvolené tiskové parametry

| Parametr                 | Hodnota              |
|--------------------------|----------------------|
| Teplota hot endu         | 210 °C               |
| Teplota tiskové podložky | 60 °C                |
| Výška vrstvy             | 0,2 mm               |
| Rychlost tisku           | 80 mm/s              |
| Hustota výplně           | 100 % (rastr -45:45) |
| Multiplikátor extruze    | 0,95 (u artefaktu 1) |
| Uspořádání vzorků        | 0° (rovnoběžné s Y)  |
| Doba tisku artefaktu     | 10h 25min            |
| Doba tisku vzorků v X    | 3h 33min             |
| Doba tisku vzorků v Y    | 6h 12min             |
| Doba tisku vzorků v Z    | 6h 38min             |

### 3.3 Zkouška tahem

Zkouška tahem probíhala dle normy ČSN EN ISO 527-1, která určuje obecné principy stanovení tahových vlastností plastů. Jako zkušební stroj byl vybrán trhací stroj od firmy Walter+Bai AG (viz Obr. 35). Jako zkušební rychlost byla zvolena rychlost 50 mm/min. Po celou dobu zkoušek byla v místnosti udržována teplota 20 °C. Pro každou orientaci a výrobce byl zvolen počet pěti vzorků, který je v normě uveden jako minimální vyhovující z hlediska preciznosti měření. U každého vzorku proběhlo před zkouškou měření tloušťky **h** a šířky zúžené části **b** pomocí digitálního posuvného měřítka z důvodu následného zjištění počátečního průřezu. Důležitým aspektem tahových zkoušek plastů bylo správné upnutí vzorků, jelikož tyto vzorky jsou velmi náchylné na prokluzování v čelistech. Během upínání bylo taktéž nutno dodržet normou stanovenou upínací vzdálenost mezi čelistmi, pro vzorky 1B tato vzdálenost činí 115 mm. Výstupem této zkoušky byl pracovní tahový diagram, který v každém okamžiku zkoušky zaznamenával závislost zatěžující síly **F** na prodloužení **ΔL**. Z těchto hodnot bylo následně možné získat následující údaje: [43]

Průřez zkušební vzorku

$$A = b \cdot h, \quad (1)$$

kde **b** je šířka zúžené části a **h** je tloušťka vzorku.

Mez pevnosti v tahu

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A}, \quad (2)$$

kde **F<sub>max</sub>** je maximální zatěžující síla.

Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení

$$\varepsilon_{tb} = \frac{L_t}{L}, \quad (3)$$

kde **L<sub>t</sub>** je prodloužení zkušební vzorku před přetržením a **L** upínací vzdálenost mezi čelistmi. [43]



Obr. 35 Trhací stroj Walter+Bai AG

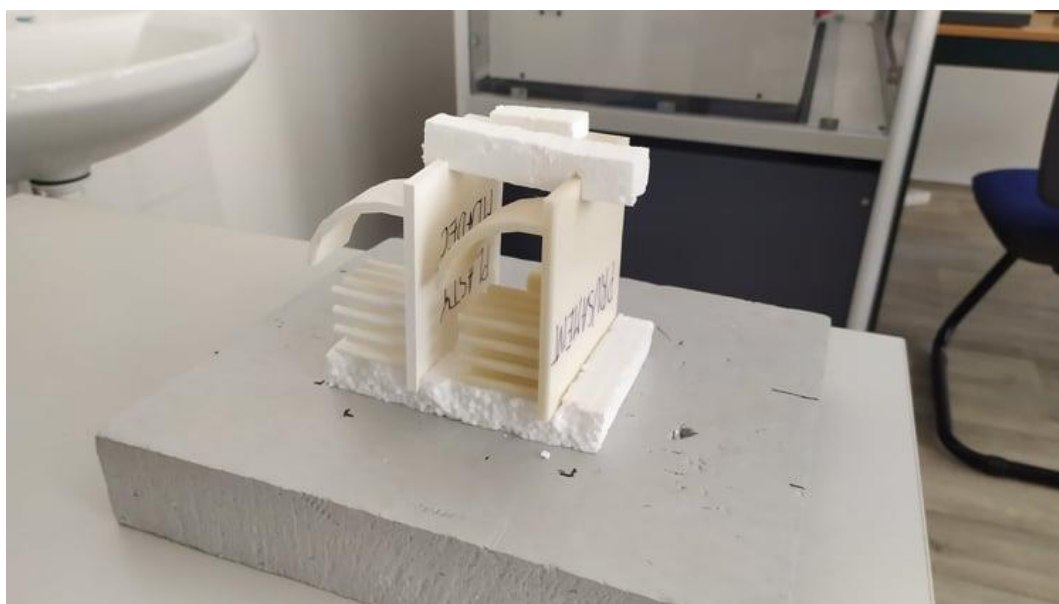
### 3.4 Analýza zkušebních artefaktů pomocí výpočetní tomografie

Analýza všech zkušebních artefaktů proběhla pomocí průmyslového výpočetního tomografu Zeiss Metrotom 1500 (viz Obr. 36). Průmyslová výpočetní tomografie je v dnešní době nejrychleji se rozvíjející oblastí nedestruktivního výzkumu. Základním principem tomografie je prozáření zkoumaného předmětu pomocí rentgenového záření z nejrůznějších úhlů za pomoci stovek až tisíců snímků. Počítačový software nejprve zrekonstruuje jednotlivé 2D plošné řezy, které jsou pokryty tzv. voxely (objemovými elementy), dále k těmto voxelům jednotlivě přiřadí koeficienty absorpce, čímž dokáže odlišit více druhů materiálů. Následně z 2D plošných řezů složí 3D prostorový obraz. [44]



*Obr. 36 Tomograf Zeiss Metrotom 1500*

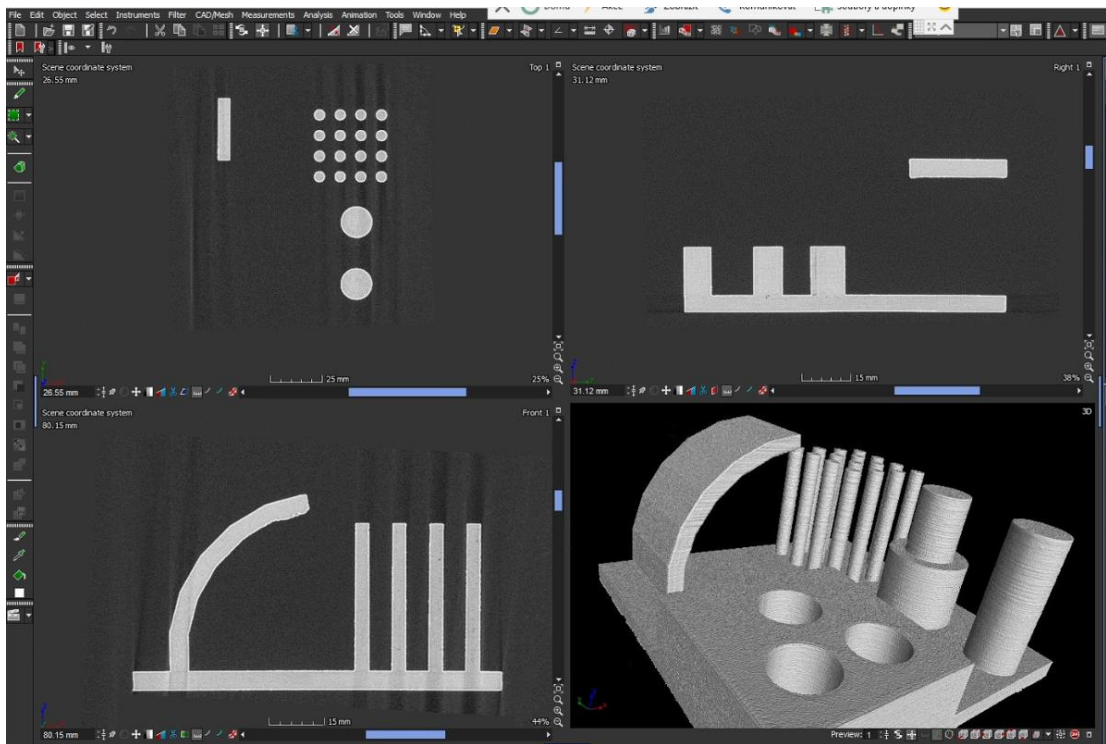
První fází bylo upnutí artefaktů před skenováním. Tato fáze je velmi důležitá, jelikož vzhledem k principu tomografie a otáčení vzorku o 360° je bezpodmínečně nutné kvalitní upnutí. Nedostatečné upnutí způsobí nevyžádaný pohyb vzorku, který vede k "šumu" a nepřesné interpretaci mraku bodů. Dále je důležitý výběr upínacího materiálu. Tomograf rozeznává během skenování materiály dle jejich hustoty, je tedy nutný materiál, který má hustotu velmi malou a je tedy možné jej poté při vyhodnocení ze skenovaného mraku bodů snadno odfiltrovat. Z tohoto důvodu byl zvolen polystyren. Vzorky byly do tomografu a podpůrného polystyrenového bloku umístěny po dvojicích v orientaci "na bok" a pro větší stabilitu dodatečně podepřeny dalšími menšími polystyrenovými bločky (viz Obr. 37).



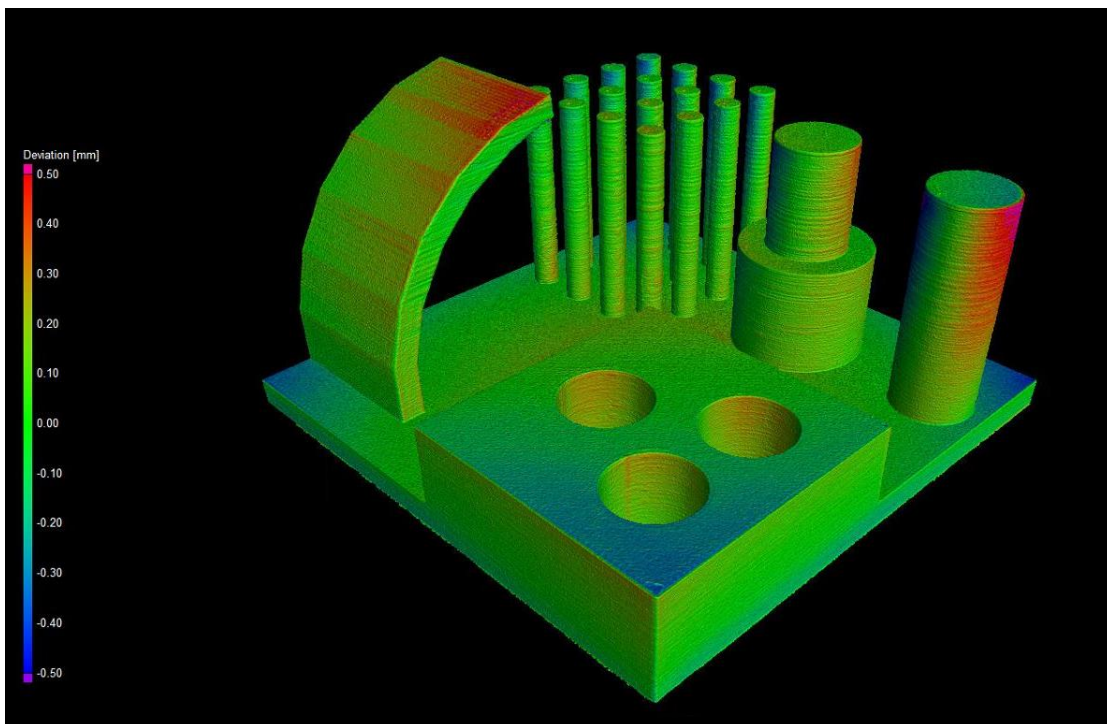
*Obr. 37 Upnutí artefaktů před CT skenem*

Následoval proces samotného skenování. Sken probíhal s následujícími parametry: napětí 180 kV, proud 897  $\mu$ A, rozlišení detektoru 2048x2048 px, velikost jednotlivých voxelů 89,36  $\mu$ m. Skenování každé dvojice artefaktů trvalo přibližně 50 minut.

Po procesu skenování byl k vyhodnocení použit software VGSTUDIO MAX 3.2.2. Tento program umožnil vyfiltrovat ze skenovaného mraku bodů oba artefakty, ty následně od sebe oddělit a pomocí funkce 3-2-1 registration je dle tří daných rovin umístit do prostoru. Dále byl možný import původního CAD modelu ve formátu STEP, který se za pomoci stejné funkce jako skenovaný model umístil do totožného prostoru, bylo tedy možné změřit jednotlivé odchylky a ty prezentovat pomocí barevné mapy, znázorněné na Obr. 39. Kromě barevné mapy proběhlo i měření některých specifických rozměrů a úhlů, a to např. rozměrů všech čepů, vnitřních otvorů, úhel maximálního sklonu a také velký statistický soubor 16 pinů u testu stringování, který dobře ukáže přesnost a opakovatelnost tisku.



Obr. 38 Prostředí programu VGSTUDIO MAX



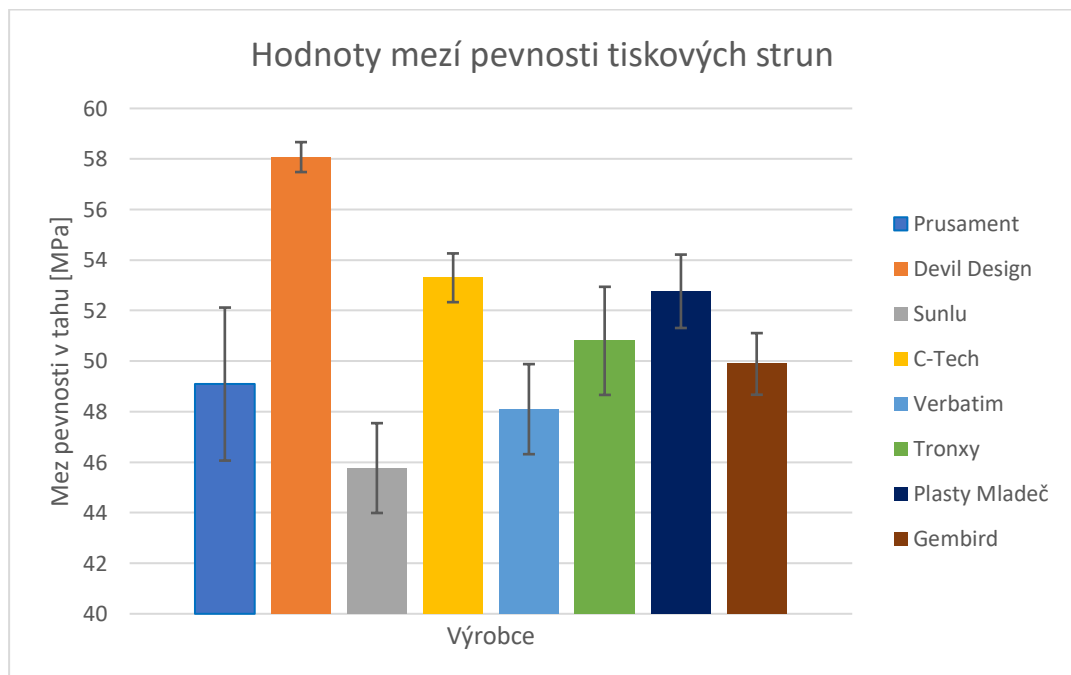
Obr. 39 Barevná mapa [Tronxy]



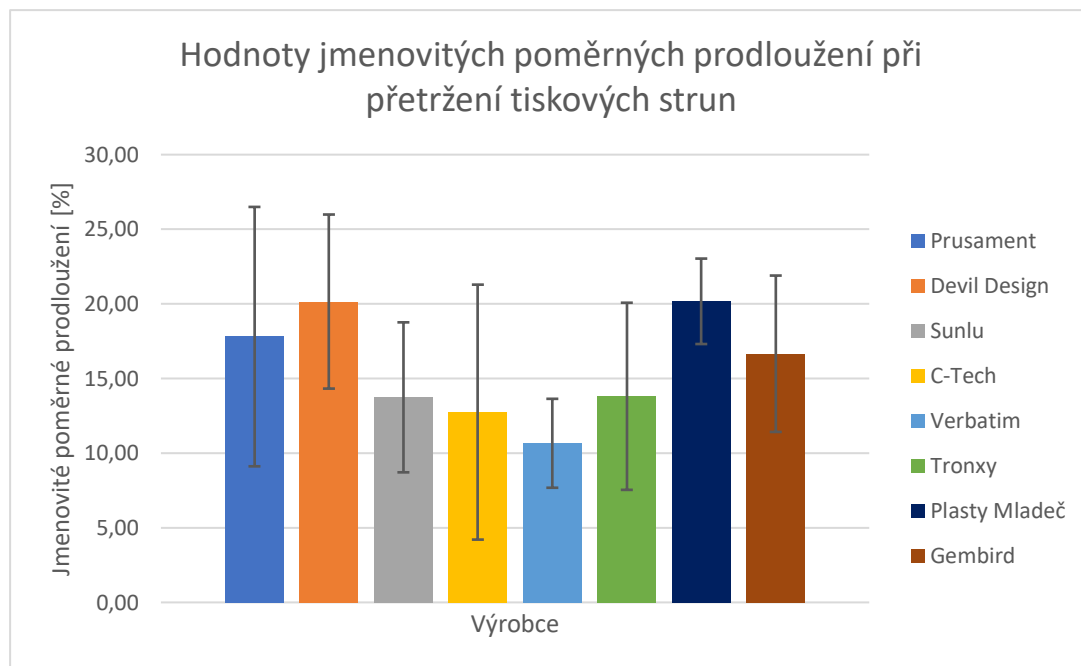
## 4 Shrnutí a vyhodnocení výsledků testování

### 4.1 Zkouška tahem tiskových strun

Tahová zkouška strun ukázala značné rozdíly mezi výrobci a jednotlivými výsledky. Oproti následným tahovým zkouškám tištěných vzorků jsou zde viditelné znatelně vyšší hodnoty odchylek měření. Z Tab. 3 je patrné, že speciálně u hodnot jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení dosahovala směrodatná odchylka až 67 % naměřené průměrné hodnoty. Tento jev mohl být způsoben několika faktory, například špatným návinem filamentu, kde některé části mohly být nepřírozně prohnuté, dále například navlhnutím materiálu či nedostatečným upnutím a následným drobným prokluzem. Vzhledem k malým rozměrům a kulatému hladkému povrchu se struny upínaly do čelistí stroje velmi obtížně. Z těchto důvodů nebyly výsledky jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení zařazeny do celkového vyhodnocení. U mezí pevnosti je na Obr. 40 patrné, že zdaleka nejvyšší pevností disponovala struna od výrobce Devil Design, naopak výrobce Sunlu za konkurencí výrazně zaostával.



Obr. 40 Hodnoty mezí pevnosti tiskových strun



Obr. 41 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení tiskových strun

Tab. 3 Výsledky tahových zkoušek tiskových strun

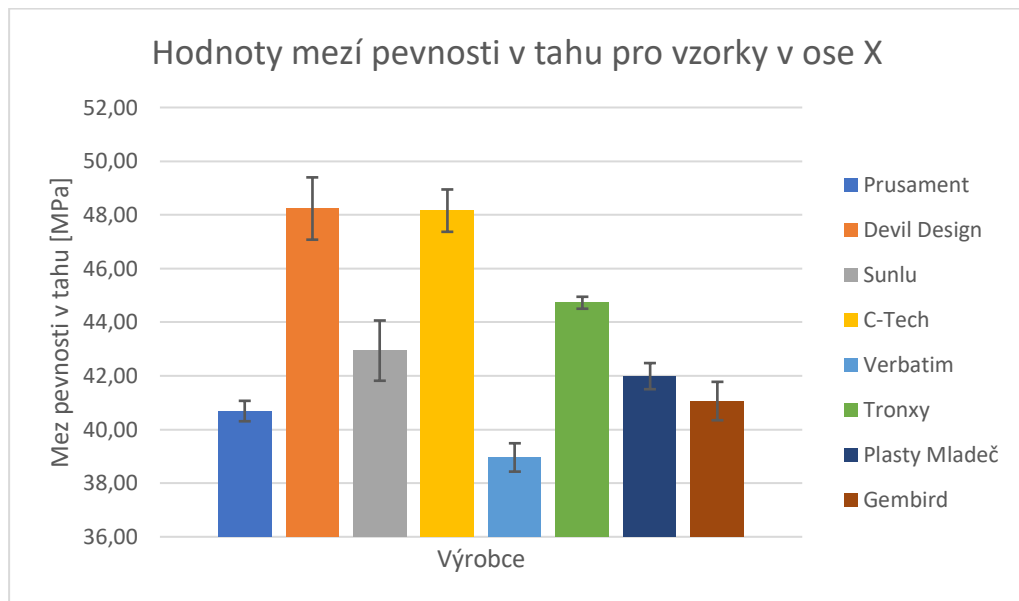
| Výrobce       | $\bar{\sigma}_m$ [MPa] | Směrodatná odchylka [MPa] | $\bar{\varepsilon}_{tb}$ [%] | Směrodatná odchylka [%] |
|---------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Prusament     | 49,09                  | 3,03                      | 17,81                        | 8,69                    |
| Devil Design  | 58,08                  | 0,59                      | 20,16                        | 5,83                    |
| Sunlu         | 45,77                  | 1,78                      | 13,74                        | 5,02                    |
| C-Tech        | 53,30                  | 0,96                      | 12,75                        | 8,54                    |
| Verbatim      | 48,10                  | 1,78                      | 10,66                        | 2,98                    |
| Tronxy        | 50,80                  | 2,14                      | 13,81                        | 6,27                    |
| Plasty Mladeč | 52,76                  | 1,45                      | 20,17                        | 2,86                    |
| Gembird       | 49,89                  | 1,22                      | 13,81                        | 6,27                    |

## 4.2 Zkouška tahem tištěných vzorků

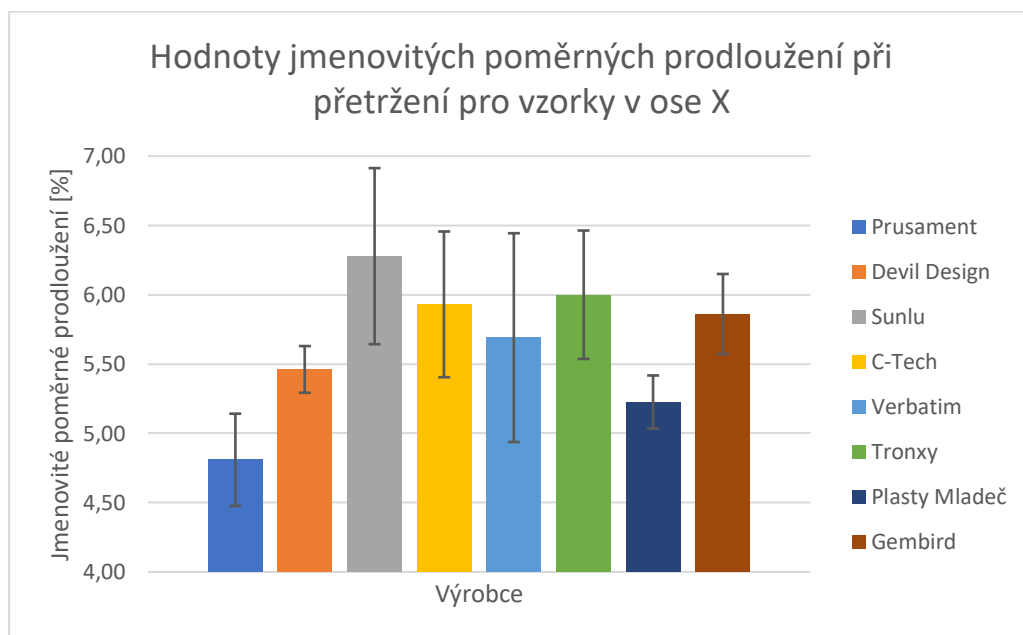
### 4.2.1 Vzorky v ose X

Vzorky tištěné v ose X neboli orientaci „na ležato“ opět ukázaly značné rozdíly mezi výrobci. U mezí pevnosti naprosto dominovali výrobci Devil Design a C-Tech s hodnotami přesahujícími 48 MPa, následované výrobcem Tronxy s necelými 45 MPa. Naopak nejdražší výrobci, a to Verbatim, Prusament a Plasty Mladeč, ukázali naprosto podprůměrné výsledky, Verbatim dokonce ani nepřekonal hranici 40 MPa. S hodnotou 38,96 MPa zaostal za nejvyšší hodnotou o 23,8 % (viz Obr. 42). U jmenovitých prodloužení dosáhli nejvyšších

hodnot výrobci Tronxy a Sunlu, oba se dostali na hodnotu rovnou, respektive přesahující 6 %, nejnižších naopak Prusament a Plasty Mladeč (viz Obr. 43).



Obr. 42 Hodnoty mezí pevnosti v tahu pro vzorky v ose X



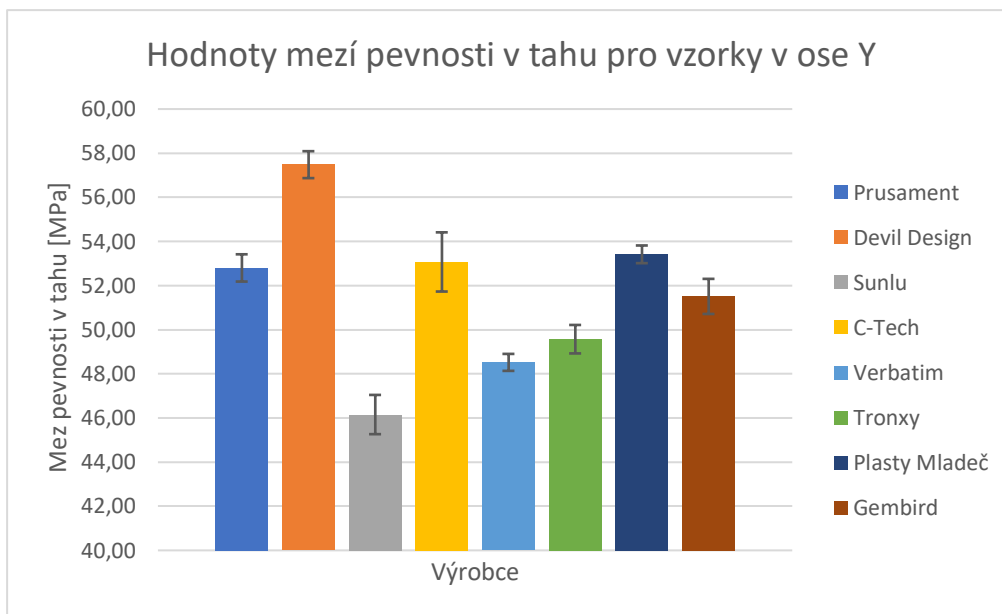
Obr. 43 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení pro vzorky v ose X

Tab. 4 Výsledky tahových zkoušek vzorků v ose X

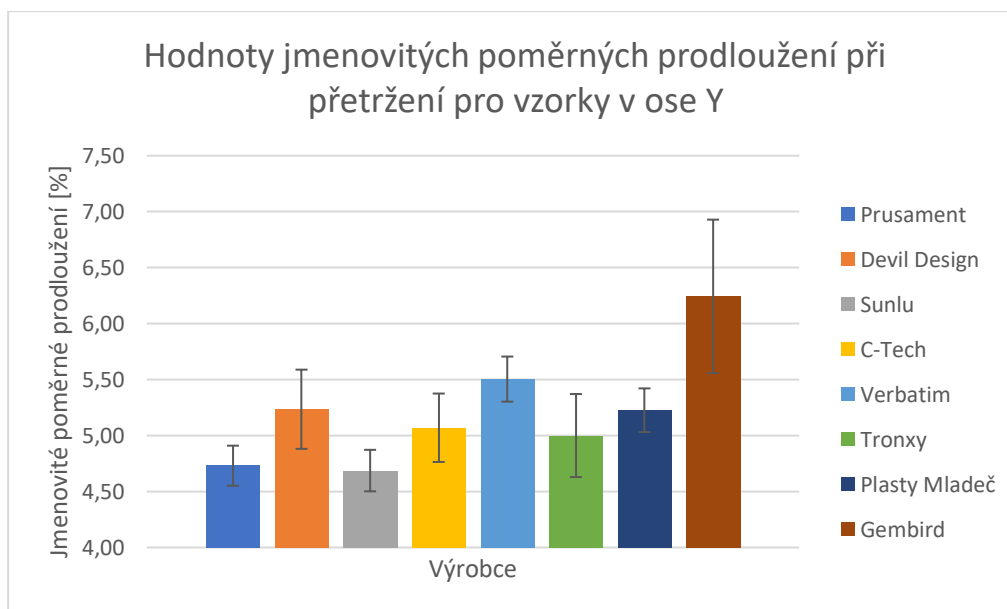
| Osa X         |                        |                           |                              |                         |
|---------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Výrobce       | $\bar{\sigma}_m$ [MPa] | Směrodatná odchylka [MPa] | $\bar{\varepsilon}_{tb}$ [%] | Směrodatná odchylka [%] |
| Prusament     | 40,69                  | 0,38                      | 4,81                         | 0,33                    |
| Devil Design  | 48,23                  | 1,16                      | 5,46                         | 0,17                    |
| Sunlu         | 42,94                  | 1,12                      | 6,28                         | 0,64                    |
| C-Tech        | 48,16                  | 0,79                      | 5,93                         | 0,53                    |
| Verbatim      | 38,96                  | 0,53                      | 5,69                         | 0,75                    |
| Tronxy        | 44,72                  | 0,22                      | 6,00                         | 0,46                    |
| Plasty Mladeč | 41,99                  | 0,49                      | 5,23                         | 0,19                    |
| Gembird       | 41,06                  | 0,72                      | 5,86                         | 0,29                    |

#### 4.2.2 Vzorky v ose Y

Tisková orientace Y neboli „na bok“ dosáhla díky své vhodné orientaci perimetrů i výplně nejvyšších hodnot mezi pevnosti v tahu ze všech výrobců. Nejvyšších hodnot, stejně jako u osy X, dosáhly vzorky od výrobce Devil Design, bezmála 57,5 MPa. Výrazně lepších výsledků zde dosáhli výrobci Prusament a Plasty Mladeč, oba se v pevnosti okolo 53 MPa rovnali výrobci C-Tech. Naopak nejhorších hodnot dosáhli nejlevnější a paradoxně také nejdražší výrobci, Sunlu a Verbatim. Vzorky od Sunlu dosáhly se svými přibližně 46 MPa o 24,5 % nižších hodnot pevností nežli vzorky od Devil Design (viz Obr. 44). U jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení dosáhl jasně nejvyšších hodnot výrobce Gembird, tento výsledek je však nutné vzhledem k výrazně vyšší směrodatné odchylce znázorněné na Obr. 45 brát s rezervou.



Obr. 44 Hodnoty mezí pevnosti v tahu pro vzorky v ose Y



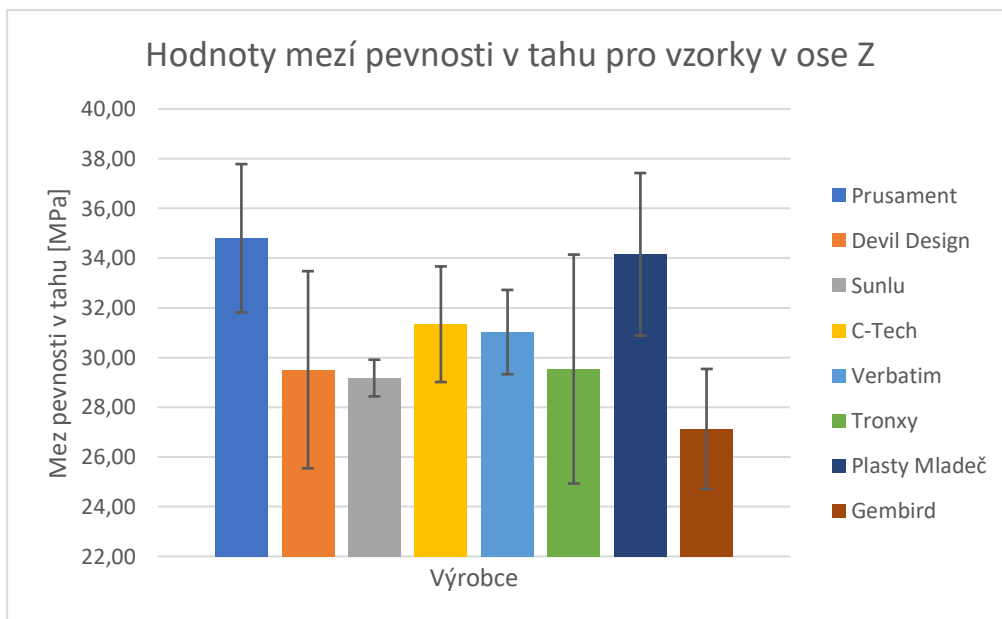
Obr. 45 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení pro vzorky v ose Y

Tab. 5 Výsledky tahových zkoušek vzorků v ose Y

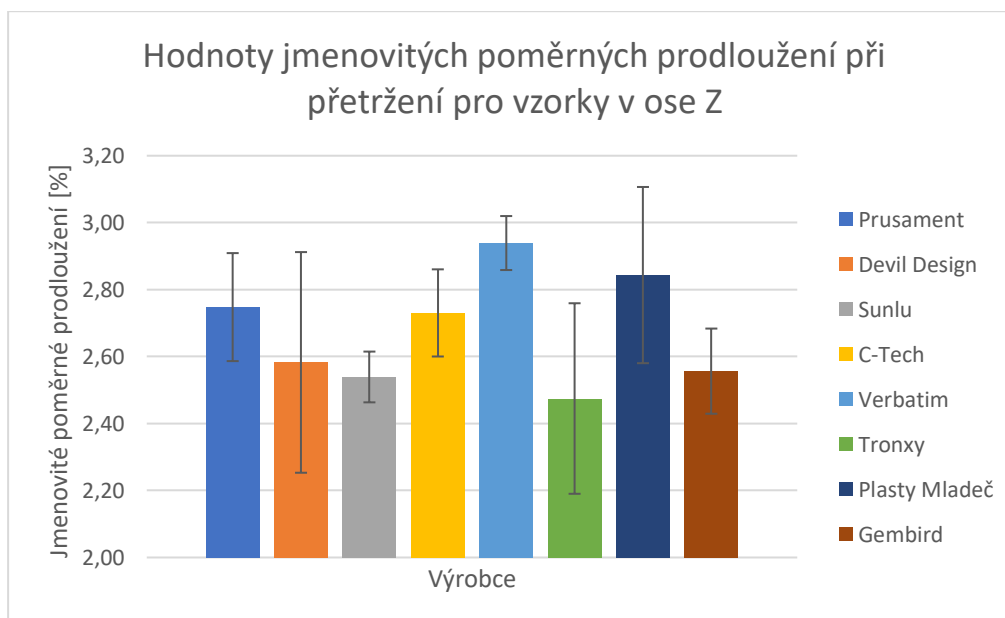
| Osa Y         |                        |                           |                              |                         |
|---------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Výrobce       | $\bar{\sigma}_m$ [MPa] | Směrodatná Odchylka [MPa] | $\bar{\varepsilon}_{tb}$ [%] | Směrodatná odchylka [%] |
| Prusament     | 52,80                  | 0,62                      | 4,73                         | 0,18                    |
| Devil Design  | 57,48                  | 0,61                      | 5,23                         | 0,35                    |
| Sunlu         | 46,16                  | 0,89                      | 4,69                         | 0,19                    |
| C-Tech        | 53,07                  | 1,34                      | 5,07                         | 0,31                    |
| Verbatim      | 48,52                  | 0,38                      | 5,50                         | 0,2                     |
| Tronxy        | 49,57                  | 0,64                      | 5,00                         | 0,37                    |
| Plasty Mladeč | 53,42                  | 0,40                      | 5,23                         | 0,2                     |
| Gembird       | 51,51                  | 0,80                      | 6,24                         | 0,69                    |

### 4.2.3 Vzorky v ose Z

Vzorky tištěné v ose Z čili v orientaci "na stojato" ukázaly ze všech tří orientací nejnižší hodnoty pevnosti. Narozdíl od orientace v ose Y, kde perimetry byly rovnoběžné a výplň byla orientována v úhlu 45° vůči směru posuvu zkušebního stroje, se zde díky své kolmé orientaci vzhledem k posuvu odtrhávaly jednotlivé vrstvy od sebe. Vzhledem k povaze a náročnosti tisku tyto vzorky také dosahovaly nejvyšších směrodatných odchylek měření, znázorněných na Obr. 46, které je nutné brát při vyhodnocování v potaz. Speciálně vzorky od výrobců Devil Design a Tronxy dosahovaly nemalých odchylek, a to 13,5, respektive 15,6 % průměrné hodnoty. Nejvyšších pevností dosáhly vzorky od výrobců Prusament a Plasty Mladeč, naopak nejnižších Gembird. Rozdíl zde činil již značných 28,3 %. Největších poměrných prodloužení dosáhl Verbatim následovaný Plasty Mladeč. Nejnižších hodnot zde naopak překvapivě dosáhli Sunlu a Tronxy, výrobci s největším poměrným prodloužením v ose X. Z Obr. 47 je však viditelné, jak moc ovlivnily výsledky směrodatné odchylky.



Obr. 46 Hodnoty mezí pevnosti v tahu pro vzorky v ose Z



Obr. 47 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení pro vzorky v ose Z

Tab. 6 Výsledky tahových zkoušek vzorků v ose Z

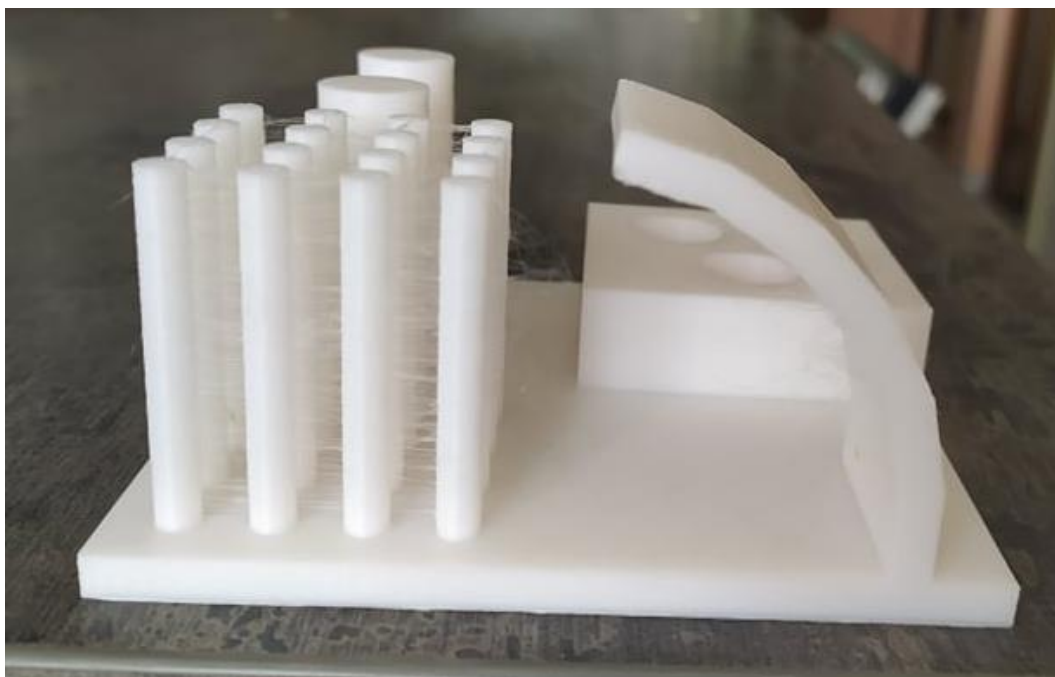
| Osa Z         |                        |                           |                              |                         |
|---------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Výrobce       | $\bar{\sigma}_m$ [MPa] | Směrodatná odchylka [MPa] | $\bar{\varepsilon}_{tb}$ [%] | Směrodatná odchylka [%] |
| Prusament     | 34,80                  | 2,98                      | 2,75                         | 0,16                    |
| Devil Design  | 29,51                  | 3,97                      | 2,58                         | 0,33                    |
| Sunlu         | 29,18                  | 0,74                      | 2,54                         | 0,08                    |
| C-Tech        | 31,34                  | 2,33                      | 2,73                         | 0,13                    |
| Verbatim      | 31,03                  | 1,70                      | 2,94                         | 0,08                    |
| Tronxy        | 29,54                  | 4,61                      | 2,47                         | 0,28                    |
| Plasty Mladeč | 34,15                  | 3,27                      | 2,84                         | 0,26                    |
| Gembird       | 27,13                  | 2,42                      | 2,56                         | 0,13                    |

## 4.3 Analýza zkušebních artefaktů

### 4.3.1 Analýza kvality tisku

Analýza kvality tisku proběhla pomocí subjektivního hodnocení. Zkoumána byla míra stringování jednotlivých výrobců, dále poté kvalita povrchu spodní části převisů a následně také sestavitelnost. Všechny výsledky jsou znázorněné v Tab. 7. Co se týče míry stringování, tak zde dosáhli nejlepších výsledků Prusament a Plasty Mladeč, oba výrobci byli v podstatě bez stringů. Výrobci Devil Design, Gembird a Verbatim lehce stringovali, avšak stále v přijatelné míře. Výrobci Tronxy a C-Tech stringovali již velmi výrazně, a naprosto nejhorších výsledků dosáhl Sunlu, jehož 16 pinů bylo pokryto velmi hustou sítí těchto „pavučinek“. Stringování se u tohoto výrobce dokonce neomezilo jen na piny, ale objevovalo se i při přejezdech z pinů na převisy a jeden z čepů (viz Obr. 48).





*Obr. 48 Stringování u artefaktu od Sunlu*

Subjektivní hodnocení kvality povrchu spodní strany převisů bylo velmi složité, většina výrobců dosáhla dosti podobných výsledků, avšak při započtení detailů, jakými jsou například příliš nahromaděný materiál, viditelné drobné prověšení či nejednotnost jednotlivých linií vrstev se jako jako nejlepší ukázali C-Tech a Tronxy. Prusament, Verbatim a Gembird také dosáhli velmi dobrých výsledků, zde však rozhodla viditelnější nejednotnost vrstev a výrazněji nahromaděný materiál v okrajových částech převisů. Sunlu dosáhl při tisku 60° převisu nejlepší kvality povrchu ze všech výrobců, avšak při 75° došlo k velmi výraznému prověšení a degradaci povrchu. Tento jev je velmi dobře viditelný na Obr. 49.



*Obr. 49 Prověšený 75° převis u artefaktu od Sunlu*

V testu sestavitelnosti dopadli nejlépe výrobci Prusament a Plasty Mladeč, u kterých se čep bez výrazné námahy podařilo nasunout i do nejmenšího otvoru s průměrem 15,1 mm (viz Obr. 50). Naopak nejhůře dopadl výrobce Tronxy, u kterého se podařilo bezproblémové sestavení pouze u otvoru s průměrem 15,3 mm. Všichni ostatní výrobci se z hlediska optimální sestavitelnosti pohybovali okolo otvoru s průměrem 15,2 mm, pro některé bylo nutné použít výraznější síly, u některých (například u Gembirdu) by se jako optimální průměr otvoru jevil průměr 15,15 mm.



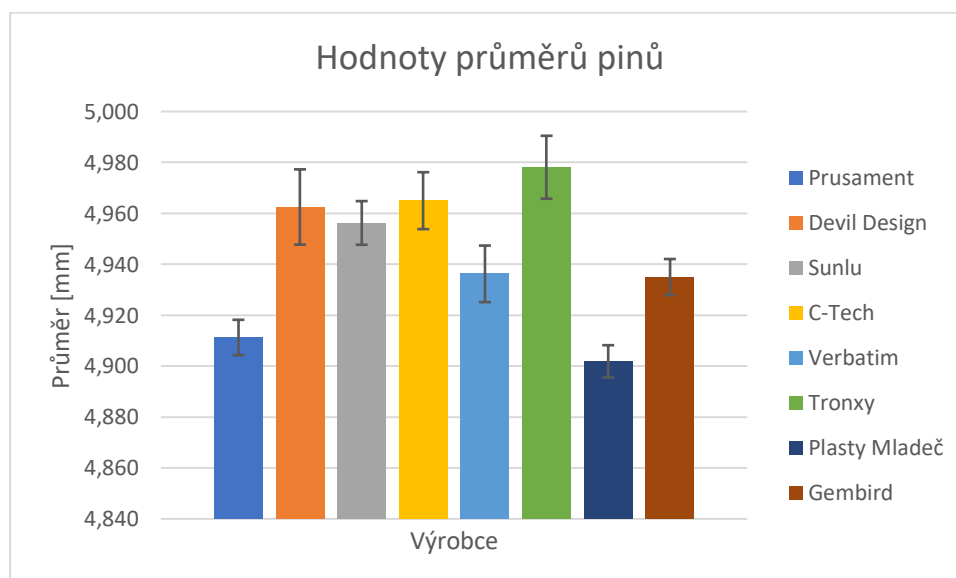
*Obr. 50 Ukázka sestavitelnosti u artefaktu od Plastů Mladeč*

Tab. 7 Výsledky analýzy kvality tisku

| Výrobce       | Míra stringování | Kvalita povrchu převisů | Sestavitelnost |
|---------------|------------------|-------------------------|----------------|
| Prusament     | 8                | 5                       | 8              |
| Devil Design  | 6                | 3                       | 2              |
| Sunlu         | 1                | 1                       | 5              |
| C-Tech        | 3                | 8                       | 3              |
| Verbatim      | 4                | 6                       | 4              |
| Tronxy        | 2                | 7                       | 1              |
| Plasty Mladeč | 7                | 2                       | 7              |
| Gembird       | 5                | 4                       | 6              |

### 4.3.2 Analýza rozměrové přesnosti tisku

První částí analýzy rozměrové přesnosti bylo určení průměrné hodnoty průměru pinů pro stringování. Jelikož se jednalo o velký statistický soubor o 16 položkách, bylo možné z tohoto souboru relativně přesně odhadnout celkovou přesnost tisku daného výrobce. Z grafu a tabulky je patrné, že nejbližše se jmenovitému průměru 5 mm přiblížil s průměrem 4,978 mm výrobce Tronxy. Naopak největší odchylkou od jmenovitého rozměru byl průměr 4,902 mm u Plastů Mladeč. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou zde však činil poměrně neznatelných 1,55 %. Z výsledků v Tab. 8 je patrné, že všechny rozměry jsou menší než jmenovitý průměr.

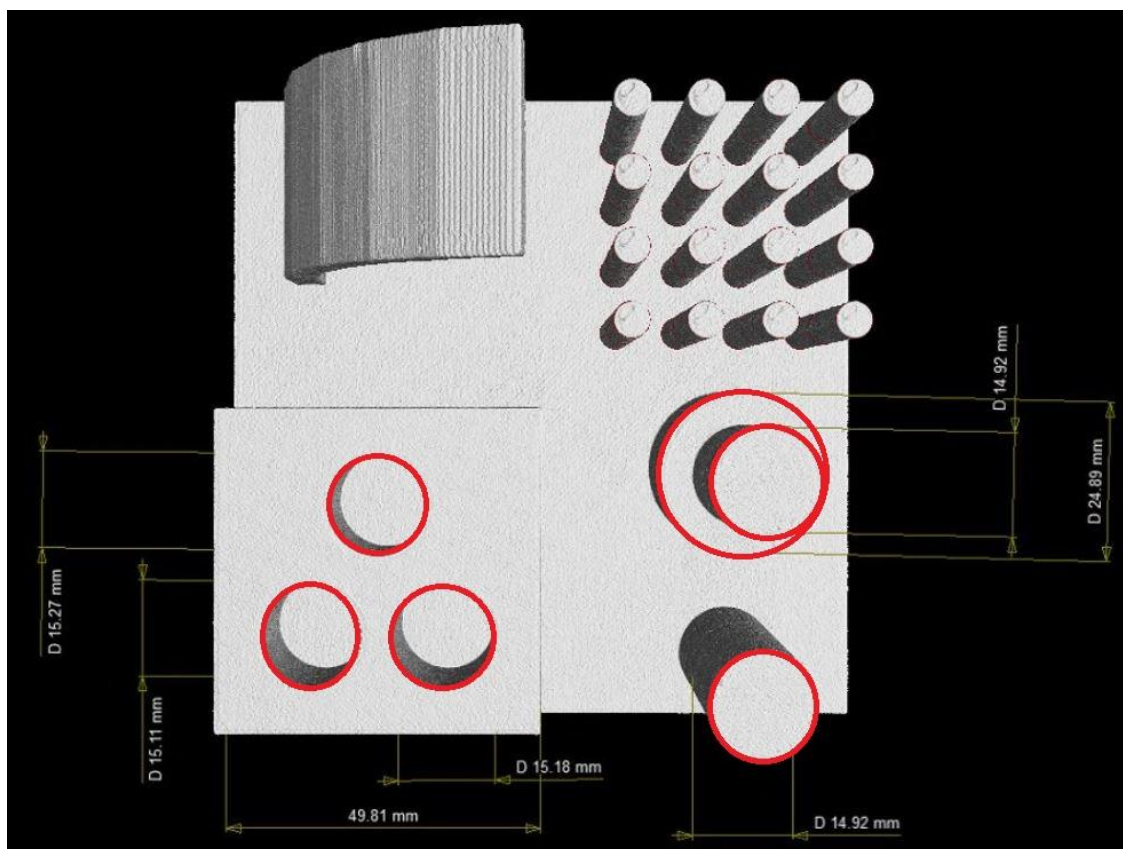


Obr. 51 Hodnoty průměrů pinů

Tab. 8 Hodnoty průměrů pinů

| Výrobce       | Průměr [mm] | Směrodatná odchylka [mm] |
|---------------|-------------|--------------------------|
| Prusament     | 4,911       | 0,007                    |
| Devil Design  | 4,963       | 0,015                    |
| Sunlu         | 4,956       | 0,009                    |
| C-Tech        | 4,965       | 0,011                    |
| Verbatim      | 4,936       | 0,011                    |
| Tronxy        | 4,978       | 0,012                    |
| Plasty Mladeč | 4,902       | 0,006                    |
| Gembird       | 4,935       | 0,007                    |

Při analýze rozměrů čepů je v Tab. 9 viditelný trend, zjištěný při měření pinů, a to, že rozměry všech čepů jsou oproti jmenovitým průměrům menší. Taktéž je viditelné, že průměry užšího čepu a zúžené části širšího čepu, které mají totožný jmenovitý rozměr, se lišily u všech až na jednoho výrobce maximálně o 2 setiny milimetru, vyšší odchylka u Plastů Mladeč mohla být způsobena kromě většího smrštění například nepřesným skenem v místě měření průměru. Lze tedy konstatovat, že „skládání“ objektů různých průměrů na sebe nemá zásadní vliv na finální průměr. Taktéž lze z tabulky konstatovat, že s rostoucím průměrem čepu taktéž vzrostla odchylka od jmenovité hodnoty, avšak stále se jedná o rozdíly v řádech setin milimetrů. Nejpřesnějšího průměru dosáhl u širšího čepu výrobce Devil Design, u zúžené části Tronxy a u užšího čepu opět Devil Design. Maximální rozdíl mezi výrobcí zde však činil pouhých 0,4 %.



Obr. 52 Měřené rozměry čepů a vnitřních otvorů u Verbatimu (vyznačené červeně)

Tab. 9 Hodnoty průměrů čepů

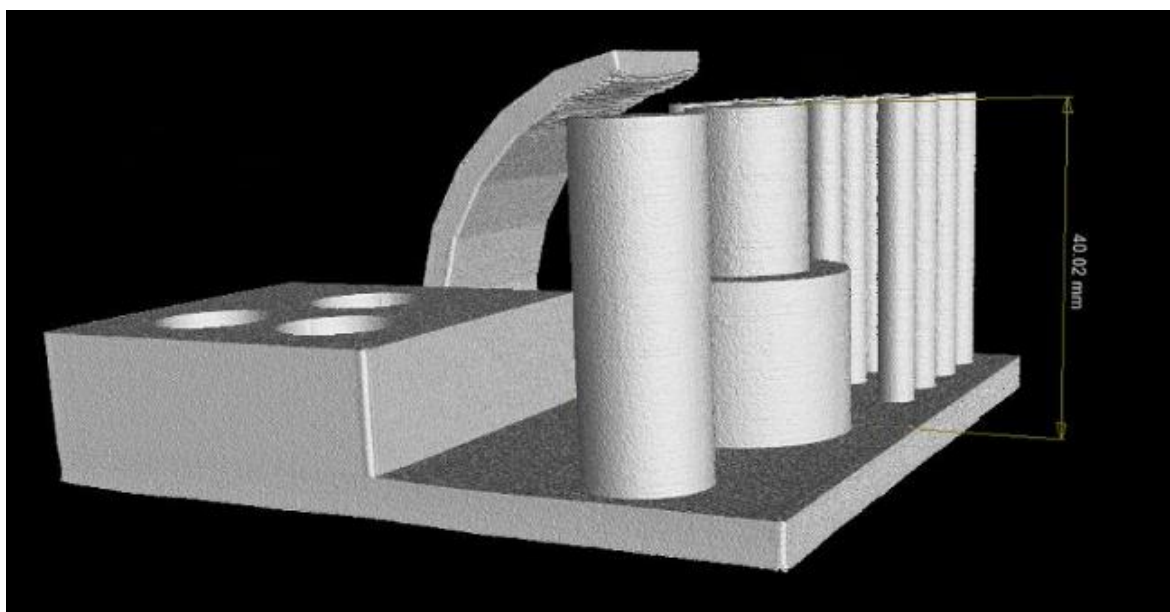
| Výrobce       | Průměr čepu 1 [mm] | Průměr zúžené části [mm] | Průměr čepu 2 [mm] |
|---------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| Prusament     | 24,88              | 14,91                    | 14,90              |
| Devil Design  | 24,91              | 14,93                    | 14,94              |
| Sunlu         | 24,86              | 14,89                    | 14,90              |
| C-Tech        | 24,88              | 14,93                    | 14,92              |
| Verbatim      | 24,89              | 14,92                    | 14,92              |
| Tronxy        | 24,89              | 14,94                    | 14,93              |
| Plasty Mladeč | 24,87              | 14,93                    | 14,88              |
| Gembird       | 24,90              | 14,93                    | 14,91              |

Měření průměru vnitřních otvorů prokázalo jednu z typických vlastností materiálu PLA, a to malé smrštění. Největší odchylka od jmenovitého rozměru zde činila pouhých 0,06 mm, neplatí zde však trend, že všechny rozměry jsou menší než jmenovité. U 4 výrobců ukázalo měření nejmenšího z otvorů rozměr o setinu milimetru větší nežli jmenovitý. Tento fakt může být opět způsoben omezenou přesností skenování či nepřesností při měření v programu VGSTUDIO. Z výsledků je patrné, že u všech tří otvorů dosáhl nejhorších výsledků Devil Design s odchylkou 0,06 mm. Naopak jako nejpřesnější se ukázali Prusament a Plasty Mladeč s odchylkou vždy pouhých 0,01 mm (viz Tab. 10).

Tab. 10 Hodnoty průměrů vnitřních otvorů

|               | Otvor Ø 15,1 mm | Otvor Ø 15,2 mm | Otvor Ø 15,3 mm |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Výrobce       | Průměr [mm]     | Průměr [mm]     | Průměr [mm]     |
| Prusament     | 15,11           | 15,19           | 15,29           |
| Devil Design  | 15,06           | 15,14           | 15,24           |
| Sunlu         | 15,11           | 15,19           | 15,29           |
| C-Tech        | 15,09           | 15,18           | 15,27           |
| Verbatim      | 15,11           | 15,18           | 15,27           |
| Tronxy        | 15,09           | 15,18           | 15,26           |
| Plasty Mladeč | 15,11           | 15,19           | 15,29           |
| Gembird       | 15,09           | 15,16           | 15,27           |

Předchozí měření ukázala skutečné rozměry různých částí artefaktu v osách X a Y, neméně důležitým aspektem je však i analýza rozměrů čepů v ose Z. Tato analýza ukázala u všech vzorků odchylku v kladném směru, tudíž větší rozměr oproti jmenovitému. Odchylky zde však byly ještě menší než u vnitřních otvorů, maximem bylo 0,05 mm u Tronxy, naopak minimem 0,02 mm u Devil Design a Plastů Mladeč, rozdíl tedy činil pouhých 0,075 %. Artefakt od výrobce Plasty Mladeč je viditelný na Obr. 53.



Obr. 53 Výška čepu [Plasty Mladeč]

Tab. 11 Hodnoty výšek čepů

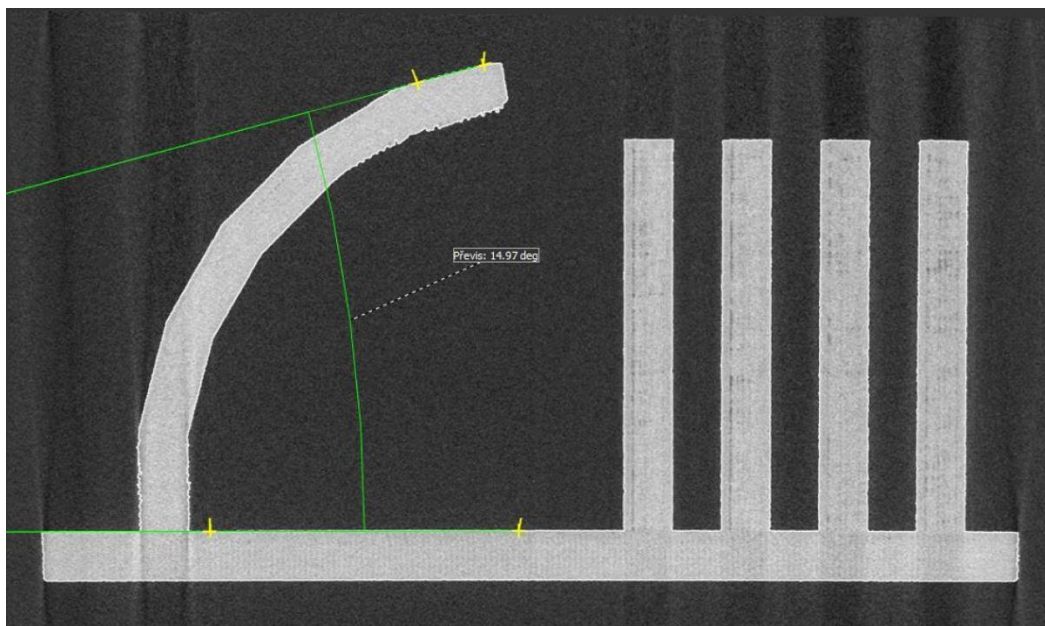
| Výrobce       | Výška čepu [mm] |
|---------------|-----------------|
| Prusament     | 40,03           |
| Devil Design  | 40,02           |
| Sunlu         | 40,03           |
| C-Tech        | 40,04           |
| Verbatim      | 40,03           |
| Tronxy        | 40,05           |
| Plasty Mladeč | 40,02           |
| Gembird       | 40,03           |

Posledním analýzou rozměrové přesnosti tisku bylo měření uhlu největšího z převisů. Toto měření spočívalo v měření úhlu mezi vnější stranou 75° převisu a rovnoběžnou rovinou základní desky, tudíž se naměřená hodnota zakomponuje do následujícího vzorce:

$$\gamma = 90 - x, \quad (4)$$

kde  $\gamma$  je úhel převisu vzhledem k rovině kolmé na základní desku (v ideálním případě 75°) a  $x$  je námi naměřený úhel.

Nejlepšího výsledku dosáhl u tohoto měření výrobce C-Tech, jehož převis se rovnal přesně jmenovitému rozměru 75°, naopak největší odchylkou se prezentoval převis od Sunlu, tato odchylka činila 0,88°, vzhledem k rovině kolmé se vytištěný převis rovná úhlu 74,12°. Z Tab. 12 je však jasně viditelné, že odchylky u tohoto měření nejsou pouze kladné či pouze záporné, vzhledem k náročnosti tisku záleží výsledek na vícero faktorech a v určité míře i na náhodě.



Obr. 54 Měření úhlu převisu [Gembird]

Tab. 12 Velikosti úhlů převisu

| Výrobce       | Úhel převisu [°] |
|---------------|------------------|
| Prusament     | 15,14            |
| Devil Design  | 14,84            |
| Sunlu         | 15,88            |
| C-Tech        | 15,00            |
| Verbatim      | 15,17            |
| Tronxy        | 15,21            |
| Plasty Mladeč | 14,88            |
| Gembird       | 14,97            |



## 5 Diskuze

Z důvodů velkých rozdílů mezi výrobci u jednotlivých testů byla vytvořena finální tabulka, která určila komplexně nejlepšího výrobce PLA (viz Tab. 13). Hodnotícím kritériem bylo bodování na základě pořadí u jednotlivých předchozích testů, kde nejlepší výrobce získal 8 bodů a následná místa vždy o bod méně, nejhorší výrobce tedy získal pouhý jeden bod. Z důvodů výrazných směrodatných odchylek však bylo z tohoto hodnocení vyřazeno měření jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení. Tato hodnota je taktéž pro běžného uživatele v drtivé většině případů relativně nedůležitá, jedná se pouze o orientační údaj o křehkosti materiálu, žádoucí je rozměrová přesnost či pevnost. U bodování je však nutné brát v potaz, že stringování, kvalita převisu a sestavitelnost byly bodovány dle subjektivního hodnocení autora.

Tab. 13 Vyhodnocení výsledků

| Test\Výrobce         | Prusa-<br>ment | Devil<br>Design | Sunlu         | C-Tech        | Verba-<br>tim  | Tronxy        | Plasty<br>Mladeč | Gem-<br>bird  |
|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|------------------|---------------|
| Pevnost struny       | 3              | 8               | 1             | 7             | 2              | 5             | 6                | 4             |
| Pevnost X            | 2              | 8               | 5             | 7             | 1              | 6             | 4                | 3             |
| Pevnost Y            | 5              | 8               | 1             | 6             | 2              | 3             | 7                | 4             |
| Pevnost Z            | 8              | 3               | 2             | 6             | 5              | 4             | 7                | 1             |
| Stringování          | 8              | 6               | 1             | 3             | 4              | 2             | 7                | 5             |
| Kvalita převisu      | 5              | 3               | 1             | 8             | 6              | 7             | 2                | 4             |
| Sestavitelnost       | 8              | 2               | 5             | 3             | 4              | 1             | 7                | 6             |
| Piny                 | 2              | 6               | 5             | 7             | 4              | 8             | 1                | 3             |
| Čepy                 | 3              | 8               | 1             | 5             | 5              | 7             | 2                | 6             |
| Otvory               | 8              | 1               | 8             | 5             | 5              | 3             | 8                | 2             |
| Výška čepu           | 6              | 8               | 6             | 2             | 6              | 1             | 8                | 6             |
| Úhel převisu         | 5              | 4               | 1             | 8             | 3              | 2             | 6                | 7             |
| <b>Součet</b>        | <b>63</b>      | <b>65</b>       | <b>37</b>     | <b>67</b>     | <b>47</b>      | <b>49</b>     | <b>65</b>        | <b>51</b>     |
| <b>Pořadí</b>        | <b>4.</b>      | <b>2.</b>       | <b>8.</b>     | <b>1.</b>     | <b>7.</b>      | <b>6.</b>     | <b>2.</b>        | <b>5.</b>     |
| <b>Cena</b>          | <b>599 Kč</b>  | <b>510 Kč</b>   | <b>361 Kč</b> | <b>414 Kč</b> | <b>631 Kč</b>  | <b>460 Kč</b> | <b>599 Kč</b>    | <b>441 Kč</b> |
| <b>Kč/bod</b>        | <b>9,5 Kč</b>  | <b>7,8 Kč</b>   | <b>9,8 Kč</b> | <b>6,2 Kč</b> | <b>13,4 Kč</b> | <b>9,4 Kč</b> | <b>9,2 Kč</b>    | <b>8,6 Kč</b> |
| <b>Pořadí Kč/bod</b> | <b>6.</b>      | <b>2.</b>       | <b>7.</b>     | <b>1.</b>     | <b>8.</b>      | <b>5.</b>     | <b>4.</b>        | <b>3.</b>     |

Z výsledků vyplývá, že nejlepších výsledků dosáhlo PLA od výrobce C-Tech, velmi těsně následováno výrobcí Plasty Mladeč a Devil Design. Naopak nejhorších výsledků dosáhl výrobce Sunlu. Pokud vezmeme v potaz i cenový faktor, je poté z výsledků patrné, že nejlepší volbou je jednoznačně opět PLA od C-Techu. Je patrné, že cenový faktor nemusí znamenat kvalitu ani nekvalitu výchozího produktu, nejlevnější Sunlu dosáhl nejhorších

výsledků a i v hodnocení ceny za 1 získaný bod skončil předposlední, druhý nejlevnější C-Tech se naopak ve finále stal nejlepší volbou. Jako velké zklamání se ukázalo PLA od Verbatimu. Ve všech testech dosáhl naprosto průměrných až podprůměrných výsledků a neobhájil tedy svou vysokou prodejní cenu. Pro uživatele, kteří upřednostňují mechanické vlastnosti, je nejlepší volbou Devil Design a C-Tech, naopak uživatelé, kteří požadují vysokou kvalitu tisku a estetický efekt, by měli zvolit Prusament či Gembird.

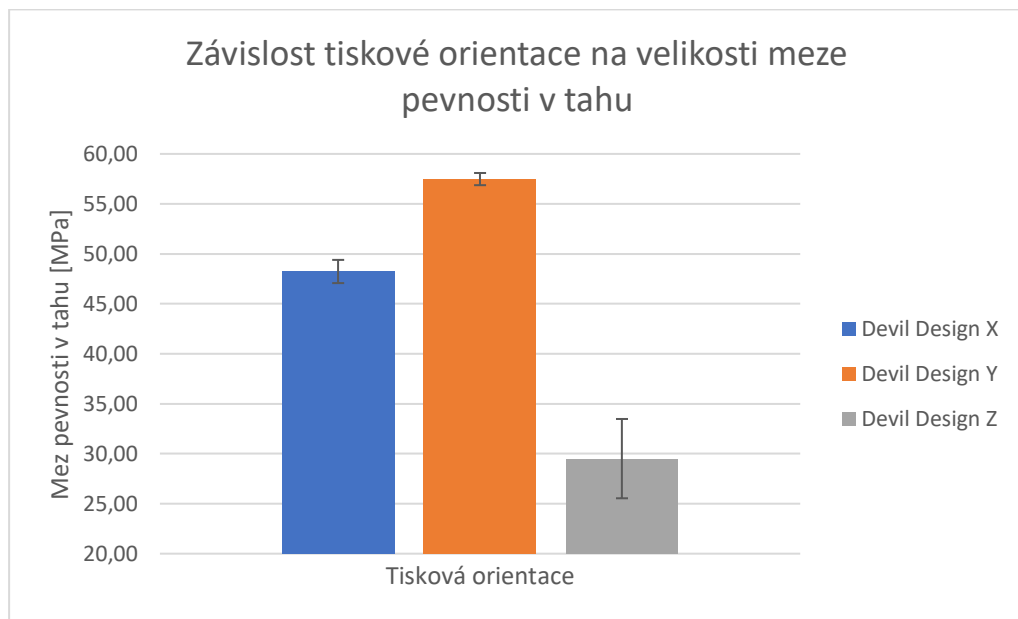
Při porovnání naměřených pevností s údaji udávanými výrobcem v Tab. 14 jsou v některých případech viditelné značné rozdíly. Devil Design a Plasty Mladeč se blíží udávaným hodnotám, naopak u Sunlu, Verbatimu a Tronxy jsou mezi těmito hodnotami propastné rozdíly, například u Verbatimu je naměřená hodnota o celých 14,5 MPa nižší.

Tab. 14 Porovnání deklarovaných a naměřených pevností

| Výrobce       | Deklarovaná pevnost [MPa] | Naměřená pevnost [MPa] |
|---------------|---------------------------|------------------------|
| Prusament     | 59,3                      | 52,8±0,62              |
| Devil Design  | 59                        | 57,48±0,61             |
| Sunlu         | 58,8                      | 46,16±0,89             |
| C-Tech        | neudává                   | 53,07±1,34             |
| Verbatim      | 63                        | 48,52±0,38             |
| Tronxy        | 60                        | 49,57±0,64             |
| Plasty Mladeč | 53                        | 53,42±0,40             |
| Gembird       | neudává                   | 51,51±0,80             |

Vyhodnocení taktéž přineslo řadu zajímavých poznatků. Například rozměrová přesnost čepů a mechanické vlastnosti v závislosti na orientaci tisku jsou v přímém rozporu s hypotézami uváděnými v rešeršní části. Syrlybayev et al [29] uvádí, že všechny odchylky u vnějších rozměrů jsou v kladném směru, tudíž že skutečná hodnota je větší, u mého experimentu však veškeré odchylky vyšly ve směru záporném. Tento fakt může být například způsoben Slicerem. Jelikož je tiskárna a Slicer od jednoho výrobce, může být v G-kódu implementována korekce z hlediska rozměrů a tudíž lepší sestavitelnosti. Naopak Hanon et al [39] uvádí jakožto nejlepší tiskovou orientaci z hlediska pevnosti osu X. Zde provedené měření však ukázalo u všech výrobců jako nejvýhodnější orientaci Y, například u Plastů Mladeč je mezi těmito orientacemi rozdíl více než 27 %. Tento rozdíl může být však jednoduše zapříčiněn chybným zápisem autora článku, který dané osy u vyhodnocení výsledků omylem prohodil. Potvrdilo však hypotézu ohledně vzorků v ose Z, u všech výrobců vykázaly tyto vzorky nejnižší pevnost, jelikož vzhledem k jejich orientaci při zkoušce tahem jsou vlákna v podstatě odtrhávána od sebe, k jejich oddělení je třeba mnohem menší síly než k přetržení

perimetrů rovnoběžných s orientací trhačího stroje a výplně pod úhlem  $45^\circ$ , jaké nalezneme u vzorků tištěných v ose Y. Rozdíl mezi vzorky v osách X a Y může být způsoben i přes v obou případech rovnoběžnou orientaci perimetrů vůči posuvu trhačího stroje rozdíly v jejich množství. Zatímco v ose X tvoří perimetry pouhou tloušťku vzorku, v ose Y je z perimetrů složena díky orientaci na bok celá šířka zkušebního tělesa. Porovnání mezi jednotlivými orientacemi je viditelné na Obr. 55. [29,39]



Obr. 55 Závislost tiskové orientace na velikosti meze pevnosti v tahu

## 6 Závěr

V rešeršní části byla popsána historie, vývoj a základní postup a principy 3D tisku. Tento postup, začínající tvorbou modelu a pokračující přes formát STL, Slicer, tisk až po postprocessing je využíván u všech druhů 3D tisku. Dále byl detailněji rozveden plastový 3D tisk a v dnešní době nejužívanější metoda FDM. U této metody byl popsán její princip, poté jednotlivé části tiskárny a jejich funkce. Byl popsán rozdíl mezi přímým podáváním a systémem Bowden, dále funkce jednotlivých částí tiskové hlavy či tiskové podložky. Taktéž byly vyjmenovány nejběžnější polymerní materiály pro FDM tisk, vyzdvihnut byl nejvyužívanější materiál PLA.

Druhá polovina rešeršní části se věnovala problematice související s tiskem PLA. Byly pojmenovány nejběžnější chyby při tisku PLA a způsob jejich maximální eliminace, dále proběhl krátký rozbor zkušebních artefaktů pro 3D tisk, jejich historie a současné podoby. Poslední kapitola rešeršní části se poté věnovala vlivu parametrů na 3D tisk technologií FDM. Tato kapitola ukázala, že správné nastavení tiskových parametrů ve Sliceru má značný vliv na výslednou kvalitu a funkčnost výtisků. Před experimentální částí následovala analýza problému dle informací načerpaných z rešeršní části a definování cílů práce.

Začátek experimentální části obsahoval návrh metodiky testování. Nejdříve byl popsán tisk testovacích vzorků dle normy ČSN EN ISO 527-2 a užití tiskové parametry. Tyto parametry bylo bohužel nutno vzhledem k základnímu nastavení upravit, jelikož speciálně vzorky v ose Z od některých výrobců bylo se základním nastavením téměř nemožné bezchybně vytisknout. Dále byla popsána metodika zkoušky tahem dle normy ČSN EN ISO 527-1. Poslední podkapitolou u metodiky testování byl popis analýzy zkušebního artefaktu pomocí výpočetní tomografie a princip samotného tomografu.

Po provedení experimentu následovalo shrnutí a vyhodnocení výsledků testování. Zkouška tahem ukázala, že nejlepší tiskovou orientací z hlediska pevnosti je orientace dle osy Y, Devil Design zde dosáhl pevnosti 57,48 MPa. U osy X dosáhl nejlepších výsledků taktéž Devil Design s pevností 48,23 MPa. Nejhorších výsledků z hlediska orientace dosáhla orientace v ose Z, kde nejlepších výsledků dosáhl Prusament s pevností 34,8 MPa. Co se týče subjektivního hodnocení zkušebního artefaktu, které zahrnovalo míru stringování, kvalitu tisku převisů a sestavitelnost, tak zde byly výsledky u jednotlivých částí velmi rozdílné, lze však ze subjektivního hodnocení autora konstatovat, že nejlepších výsledků dosáhl Prusament. Měření rozměrové přesnosti pomocí tomografu ukázalo rozdíly mezi výrobci v řádech pouhých setin milimetru, avšak výsledky byly značně nepředvídatelné.

Naprosto běžným jevem byl fakt, že jeden výrobce disponoval velmi vysokou přesností při tisku vnitřních otvorů, ale naopak měl oproti konkurenci horší přesnost tisku vnějších tvarů (čepů a pinů). Měření taktéž ukázalo, že až na čtyři nejmenší otvory měly všechny vnější i vnitřní tvary odchylky v horizontální směru v záporných hodnotách, byly tedy menší oproti jmenovité hodnotě, naopak ve vertikálním směru byly čepy vždy větší. Měření úhlu převisu naopak ukázalo rozdíly v odchylkách v obou směrech. Výsledné bodování ukázalo, že nejlepším PLA je dle testu i cenového kritéria výrobce C-Tech, naopak nejhorším Sunlu a po započtení cenového kritéria Verbatim.

Veškeré cíle bakalářské práce byly splněny.

# Seznam použité literatury

- [1] GUNASEKARAN, K.N., Vishaal ARAVINTH, C.B. MUTHU KUMARAN, K. MADHANKUMAR a S. PRADEEP KUMAR. Investigation of mechanical properties of PLA printed materials under varying infill density. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-03-23]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.09.041
- [2] BERÁNEK, Libor. Vývoj aditivních technologií, používané principy výroby, typický po-stup výroby [Přednáška]. In: . Praha: ČVUT v Praze, 2019 [cit. 2021-03-19].
- [3] MOREAU, Clément. The State of 3D Printing 2020 Edition. Sculpteo [online]. Villejuif, San Francisco, 2020 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: [https://info.sculpteo.com/hubfs/downloads/The%20State%20of%203D%20Printing\\_2020%20edition.pdf](https://info.sculpteo.com/hubfs/downloads/The%20State%20of%203D%20Printing_2020%20edition.pdf)
- [4] Laserové sintrování. Materialise [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravylaserove-sintrovani>
- [5] SCHOTTE, Greg. A Brief History of Additive Manufacturing. Trimech [online]. 2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://blog.trimech.com/a-brief-history-of-additive-manufacturing>
- [6] KOVÁČIK, Miroslav. Historie 3D tisku. 3dfactory [online]. 27.10.2017 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [7] The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. Sculpteo [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [8] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vydání. Singapore: World Scientific Publishing, 2010. ISBN 9812778977.

- [9] ZAPLATÍLEK, Dominik. Rapid prototyping: vysvětlení, využití. Medium [online]. 3.1.2021 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://medium.com/design-kisk/rapid-prototyping-vysv%C4%9Btlen%C3%AD-vyu%C5%BEit%C3%AD-8505bf920c28>
- [10] 7 Rapid Prototyping Methods You Need for Your Hardware Setup. ManufacturingHub [online]. 2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.manufacturinghub.io/prototyping/7-rapid-prototyping-methods-you-need-for-your-hardware-startup/>
- [11] WILLIAMS, Chris. Top 7 Methods for Making 3D Rapid Prototypes. Star Rapid [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.starrapid.com/blog/top-7-methods-for-making-3d-rapid-prototypes/>
- [12] TANEVA, Emilia, Budi KUSNOTO a Carla A. EVANS. 3D Scanning, Imaging, and Printing in Orthodontics. Issues in Contemporary Orthodontics [online]. InTech, 2015, 2015-09-03 [cit. 2021-03-23]. ISBN 978-953-51-2161-9. Dostupné z: [doi:10.5772/60010](https://doi.org/10.5772/60010)
- [13] CHAKRAVORTY, Dibya. STL File Format (3D Printing) - Simply Explained. All3DP [online]. 14.2.2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- [14] Main Parts of FDM 3D Printers. APM Designs [online]. 9.2.2020 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: [https://apm-designs.com/3d-printer-main-components/#Filament\\_Diameter](https://apm-designs.com/3d-printer-main-components/#Filament_Diameter)
- [15] MILOVANOVIĆ, Aleksa, Aleksandar SEDMAK, Aleksandar GRBOVIĆ, Zorana GOLUBOVIĆ, Goran MLADENOVIĆ, Katarina ČOLIĆ a Miloš MILOŠEVIĆ. Comparative analysis of printing parameters effect on mechanical properties of natural PLA and advanced PLA-X material. Procedia Structural Integrity [online]. 2020, 28, 1963-1968 [cit. 2021-03-23]. ISSN 24523216. Dostupné z: [doi:10.1016/j.prostr.2020.11.019](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.019)
- [16] BANJANIN, Bojan, Gojko VLADIĆ, Magdolna PÁL, Vladimir DIMOVSKI, Savka ADAMOVIĆ a Gordana DELIĆ. PRODUCTION FACTORS INFLUENCING MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF FDM PRINTED EMBOS-SING DIES. Proceedings of 9th International Symposium on Graphic Engineering and Design [online]. Faculty of Technical Sciences, 2018, 2018, , 225-236 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [doi:10.24867/GRID-2018-p28](https://doi.org/10.24867/GRID-2018-p28)

- [17] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna. Svět hardware [online]. 21.2.2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [18] ALSOP, Thomas. Worldwide most used 3D printing materials, as of July 2018. Statista [online]. 2.3.2020 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/800454/worldwide-most-used-3d-printing-materials/>
- [19] HOMOLA, Jan. PLA. 3D-tisk [online]. 18.9.2013 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla/>
- [20] PLA. RepRap Wiki [online]. 2017 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/PLA>
- [21] LANZOTTI, Antonio, Massimo MARTORELLI, Saverio MAIETTA, Salvatore GERBINO, Francesco PENTA a Antonio GLORIA. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. Procedia CIRP [online]. 2019, 79, 143-146 [cit. 2021-03-23]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.02.030
- [22] Materiály pro tisk technologií FDM. 3D tisk Online [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-prehled-materialu-pro-3d/>
- [23] DESTEFANO, Vincent, Salaar KHAN a Alonzo TABADA. Applications of PLA in modern medicine. Engineered Regeneration [online]. 2020, 1, 76-87 [cit. 2021-03-23]. ISSN 26661381. Dostupné z: doi:10.1016/j.engreg.2020.08.002
- [24] Prusament PLA. Prusament [online]. 2018 [cit. 2021-3-23]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/>
- [25] YAMAN, Ulas. Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2018, 94(5-8), 2187-2197 [cit. 2021-03-23]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-1018-2
- [26] ZHU, Quan, Yushan LIU, Yujun CAI a Meng WU. Research on the Shrinkage of Model with Hole in PLA Material Based on the FDM 3D Printing. Proceedings of the 2017 6th International Conference on Measurement, Instrumentation and



Automation (ICMIA 2017) [online]. Paris, France: Atlantis Press, 2017, 2017, , -  
[cit. 2021-03-23]. ISBN 978-94-6252-387-6. Dostupné z: doi:10.2991/icmia-17.2017.95

[27] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Introduction to FDM 3D printing. 3D Hubs [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>

[28] BACH, Martin. Jak vyřešit nejčastější problémy při 3D tisku. Josef Průša [online]. 27.4.2018 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-vyresit-nejcastejsi-problemy-pri-3d-tisku/>

[29] SYRLYBAYEV, Daniyar, Asma PERVEEN a Didier TALAMONA. Fused deposition modelling: Effect of extrusion temperature on the accuracy of print. Materials Today: Proceedings [online]. 2020 [cit. 2021-03-23]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.716

[30] HAQUE, Sabit Shariar. Minimizing Stringing Issues In FDM Printing. ResearchGate [online]. 2.12.2020, 8, [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.35536.74247

[31] Stringing with Prusaslicer solved with Cura. Prusaprinters Forum [online]. 15.11.2019 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://forum.prusaprinters.org/forum/original-prusa-i3-mk3s-mk3-how-do-i-print-this-printing-help/stringing-with-prusaslicer-solved-with-cura/>

[32] KRUTH, J.P. Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. CIRP Annals [online]. 1991, 40(2), 603-614 [cit. 2021-03-23]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)61136-6

[33] The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 93. 2017 [cit. 2021-03-23]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-0570-0>

[34] JAYRAM, Dureen, Amit BAGCHI, C.C. JARA-ALMONTE a Sean O'REILLY. Benchmarking of Rapid Prototyping Systems - Beginning to Set Standards. Texas ScholarWorks [online]. 1994, 8. [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: doi:10.15781/T2BG2HV81

- [35] MOYLAN, Shawn, John SLOTWINSKI, April COOKE, Kevin JURRENS a M. ALKAN DONMEZ. Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes. National Institute of Standards and Technology [online]. 15.8.2012, , 19. [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/publications/proposal-standardized-test-artifact-additive-manufacturing-machines-and-processes>
- [36] #3DBenchy – A Small Giant in the World of 3D Printing. 3DBenchy [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.3dbenchy.com/3dbenchy-a-small-giant-in-the-world-of-3d-printing/>
- [37] TANG, Can, Junwei LIU, Yang YANG, Ye LIU, Shiping JIANG a Wenfeng HAO. Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures. Composites Part C: Open Access [online]. 2020, 3 [cit. 2021-03-23]. ISSN 26666820. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jcomc.2020.100076](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100076)
- [38] NUGROHO, A, R ARDIANSYAH, L RUSITA a I L LARASATI. Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing. Journal of Physics: Conference Series [online]. 2018, 1130 [cit. 2021-03-23]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: [doi:10.1088/1742-6596/1130/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1130/1/012017)
- [39] HANON, Muammel M., Róbert MARCZIS a László ZSIDAI. Influence of the 3D Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering [online]. 2020, 65(1), 38-46 [cit. 2021-03-23]. ISSN 1587-379X. Dostupné z: [doi:10.3311/PPme.13683](https://doi.org/10.3311/PPme.13683)
- [40] PANDZIC, Adi, Damir HODZIC a Aleksa MILOVANOVIC. Influence of Material Colour on Mechanical Properties of PLA Material in FDM Technology. Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium 2019 [online]. DAAAM International Vienna, 2019, 2019, , 0555-0561 [cit. 2021-03-23]. DAAAM Proceedings. ISBN 9783902734228. Dostupné z: [doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.075](https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.075)
- [41] ČSN EN ISO 527-2. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[42] ČERMÁK, David. Vlastnosti těles připravených 3D tiskem. Praha, 2019. Bachelářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

[43] ČSN EN ISO 527-1. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[44] HNÍZDIL, František. Vývoj průmyslové tomografie. MM spektrum [online]. Praha: České metrologická společnost, 2018, 14. 11. 2018 [cit. 2021-7-6]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyvoj-prumyslove-tomografie>

# Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1 Komplexnost aditivní výroby [2] .....   | 12 |
| Obr. 2 Benefity 3D tisku dle uživatelů [3].....  | 13 |
| Obr. 3 Procentuální podíl investic do oblasti 3D tisku [3] .....                                   | 14 |
| Obr. 4 Tiskárna SLA-1 z roku 1988 [7].....   | 14 |
| Obr. 5 Princip metody SLA [10] .....   | 16 |
| Obr. 6 Binder Jetting [11] .....   | 17 |
| Obr. 7 Princip metody LOM [11].....  | 17 |
| Obr. 8 Zobrazení koule ve formátu STL [12].....  | 18 |
| Obr. 9 Princip výroby pomocí technologie 3D tisku [13] .....                                       | 19 |
| Obr. 10 Schéma metody FDM [16] .....   | 20 |
| Obr. 11 Porovnání přímého extrudéru a systému Bowden [17] .....                                    | 21 |
| Obr. 12 Procentuální zastoupení materiálů pro 3D tisk v roce 2018 [18] .....                       | 22 |
| Obr. 13 Hodnoty smykové pevnosti recyklovaného PLA [21] .....                                      | 23 |
| Obr. 14 Data sheet PLA od firmy Prusa [24] .....   | 23 |
| Obr. 15 Analýza vnitřního pnutí a smrštění obdelníkového otvoru [25].....                          | 25 |
| Obr. 16 Zkušební prstenec experimentu dle Zhu [26] .....   | 25 |
| Obr. 17 Schematické zakřivení okrajů [27] .....  | 26 |
| Obr. 18 Grafické znázornění rozměrových odchylek válcovitých výstupků v osách X a Y<br>[29] .....  | 27 |
| Obr. 19 Stringování [31].....  | 27 |
| Obr. 20 Zkušební artefakt navržený Childsem a Justerem [33] .....                                  | 28 |
| Obr. 21 Zkušební artefakt 3DBenchy [36] .....  | 30 |
| Obr. 22 Závislost velikosti meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu na teplotě tisku [37]<br>..... | 31 |
| Obr. 23 Závislost mezi velikostí výšky vrstvy a mezí pevnosti v ohybu [38].....                    | 32 |
| Obr. 24 Závislost meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu na rychlosti tisku [37].....             | 32 |
| Obr. 25 Vliv hustoty výplně na hodnotu meze pevnosti v tahu [1] .....                              | 33 |
| Obr. 26 Napěťová křivka pro vzorky s odlišnou orientací rastru (viz legenda) [39].....             | 34 |
| Obr. 27 Vliv barvy filamentu na mez pevnosti v tahu [40] .....                                     | 35 |
| Obr. 28 Zkušební vzorek 1B pro tahové zkoušky plastů [42] .....                                    | 38 |
| Obr. 29 Model zkušebního artefaktu .....   | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 30 Tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ s naznačením základního souřadnicového systému..... | 40 |
| Obr. 31 Vzorky v ose X v prostředí PrusaSliceru.....   | 40 |
| Obr. 32 Poškozený vzorek v ose Z .....   | 41 |
| Obr. 33 Vzorky v ose Z s přidaným raftem .....   | 42 |
| Obr. 34 Vzorek v ose Y poškozený warpingem .....   | 43 |
| Obr. 35 Trhací stroj Walter+Bai AG .....   | 45 |
| Obr. 36 Tomograf Zeiss Metrotom 1500.....  | 46 |
| Obr. 37 Upnutí artefaktů před CT skenem .....  | 46 |
| Obr. 38 Prostředí programu VGSTUDIO MAX .....  | 47 |
| Obr. 39 Barevná mapa [Tronxy].....   | 48 |
| Obr. 40 Hodnoty mezi pevnosti tiskových strun .....  | 49 |
| Obr. 41 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení tiskových strun .....        | 50 |
| Obr. 42 Hodnoty mezi pevnosti v tahu pro vzorky v ose X .....                                | 51 |
| Obr. 43 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení pro vzorky v ose X..         | 51 |
| Obr. 44 Hodnoty mezi pevnosti v tahu pro vzorky v ose Y .....                                | 53 |
| Obr. 45 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení pro vzorky v ose Y ..        | 53 |
| Obr. 46 Hodnoty mezi pevnosti v tahu pro vzorky v ose Z.....                                 | 55 |
| Obr. 47 Hodnoty jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení pro vzorky v ose Z ..        | 55 |
| Obr. 48 Stringování u artefaktu od Sunlu .....   | 57 |
| Obr. 49 Prověšený 75° převis u artefaktu od Sunlu.....                                       | 57 |
| Obr. 50 Ukázka sestavitelnosti u artefaktu od Plastů Mladeč .....                            | 58 |
| Obr. 51 Hodnoty průměrů pinů.....  | 59 |
| Obr. 52 Měřené rozměry čepů a vnitřních otvorů u Verbatimu (vyznačené červeně) .....         | 61 |
| Obr. 53 Výška čepu [Plasty Mladeč] .....   | 62 |
| Obr. 54 Měření úhlu převisu [Gembird] .....  | 64 |
| Obr. 55 Závislost tiskové orientace na velikosti meze pevnosti v tahu .....                  | 67 |

# Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1 Seznam zvolených výrobců PLA filamentů .....         | 36 |
| Tab. 2 Zvolené tiskové parametry .....                      | 43 |
| Tab. 3 Výsledky tahových zkoušek tiskových strun.....       | 50 |
| Tab. 4 Výsledky tahových zkoušek vzorků v ose X.....        | 52 |
| Tab. 5 Výsledky tahových zkoušek vzorků v ose Y.....        | 54 |
| Tab. 6 Výsledky tahových zkoušek vzorků v ose Z .....       | 56 |
| Tab. 7 Výsledky analýzy kvality tisku.....                  | 59 |
| Tab. 8 Hodnoty průměrů pinů.....                            | 60 |
| Tab. 9 Hodnoty průměrů čepů .....                           | 61 |
| Tab. 10 Hodnoty průměrů vnitřních otvorů.....               | 62 |
| Tab. 11 Hodnoty výšek čepů .....                            | 63 |
| Tab. 12 Velikosti úhlů převisu.....                         | 64 |
| Tab. 13 Vyhodnocení výsledků .....                          | 65 |
| Tab. 14 Porovnání deklarovaných a naměřených pevností ..... | 66 |

# Seznam příloh

**Příloha 1:** CT sken Prusament

**Příloha 2:** CT sken Devil Design

**Příloha 3:** CT sken Sunlu

**Příloha 4:** CT sken C-Tech

**Příloha 5:** CT sken Verbatim

**Příloha 6:** CT sken Tronxy

**Příloha 7:** CT sken Plasty Mladeč

**Příloha 8:** CT sken Gembird