

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

**Aplikace 3D tisku pro výrobu prototypových dílů automobilů**

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2019/2020

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Filip Semerád**  
Osobní číslo: **D16166**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Téma práce: **Aplikace 3D tisku pro výrobu prototypových dílů automobilů**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Zásady pro vypracování

Body zadání:

1. Přehled současných technologií 3D tisku.
2. Materiály pro prototypové díly automobilů.
3. Aplikace FDM 3D tiskárny.
4. Návrh postupu tisku vybraného dílu v měřítku s použitím SolidWorks.

Rozsah pracovní zprávy: **30 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

- [1] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 9788025148761.
- [2] PRŮŠA, Josef a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [3] KUMAR, L. Jyothish, Pulak M. PANDEY a David Ian WIMPENNY, ed. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer Singapore, 2019, 311 s. ISBN 978-981-13-0304-3. DOI 10.1007/978-981-13-0305-0.
- [4] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty: stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [5] 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.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Krmela, Ph.D.**  
Trienčanská univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíně

Datum zadání bakalářské práce: **18. února 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2020**

L.S.

---

**doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Jakub Vágner, Ph.D.**  
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 3. srpna 2020

Filip Semerád

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu doc. Ing. Janu Krmelovi, Ph.D., za odborné vedení při zpracování zadaného tématu. Velice si vážím vstřícného přístupu a komunikace i přes mimořádná opatření, která nás v tomto akademickém roce postihla. Za pomoc s prováděnými experimenty v laboratořích VVCD děkuji panu Ing. Jakobovi Zajícovi. Mé poděkování patří také mé nejbližší rodině a skvělé kamarádce Gabriele Hofmanové za podporu během studia.

## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku aplikace 3D tisku v oblasti vývoje a výroby prototypových dílů automobilů. V rámci experimentů jsou provedeny statické zkoušky pevnosti v tahu normovaných zkušebních vzorků vytištěných na dvou různých FDM 3D tiskárnách z vybraných materiálů filamentů. Experimenty byly realizovány na dvou různých univerzálních zkušebních zařízeních s mechanickým a video průtahoměrem s cílem získat hodnoty skutečných napětí v závislosti na poměrném prodloužení pracovní oblasti zkušebních vzorků. Výsledkem práce jsou v programu SolidWorks navrhnuté a 3D tiskem vyhotovené části zádržného bezpečnostního systému automobilu.

## **Klíčová slova**

FDM 3D tisk, aditivní výroba, prototyp, SolidWorks, tahová zkouška, zádržný bezpečnostní systém automobilu

## **Title**

Application of 3D printing for production of prototype car parts

## **Annotation**

The bachelor thesis is focused on the application of 3D printing in the field of development and production of prototype car parts. Within the experiments are performed static tests of tensile strength of standardized test specimens printed on two different FDM 3D printers from selected filament materials. The experiments were performed on two different universal testing machines with a mechanical and video extensometer in order to obtain the values of actual stresses depending on the relative elongation of the working areas of the test specimens. The result of the work are 3D printed parts of the car safety restraint system designed in the SolidWorks software.

## **Keywords**

FDM 3D printing, additive manufacturing, prototype, SolidWorks, tensile testing, car safety restraint system

## Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	10
Seznam grafů.....	10
Seznam zkratk.....	11
Úvod.....	13
1 Cíl bakalářské práce.....	14
2 Přehled současných technologií 3D tisku.....	15
2.1 Stereolitografie.....	15
2.2 3D tisk spojováním práškového materiálu.....	17
2.3 3D tisk vytlačováním materiálu.....	18
2.4 Proces 3D tisku.....	21
3 Materiály pro prototypové díly automobilů.....	25
3.1 Definice prototypu a jeho materiály.....	25
3.2 Materiály pro FDM 3D tisk.....	25
4 Aplikace FDM 3D tiskárny.....	33
4.1 Aktuální využití a budoucnost 3D tisku v automobilovém průmyslu.....	33
4.2 Experimenty – tahové zkoušky PLA filamentů.....	37
5 Návrh postupu tisku vybraného dílu s použitím SolidWorks.....	52
5.1 Tvorba 3D geometrických modelů.....	53
5.2 Příprava modelů k 3D tisku a jeho provedení.....	55
5.3 Zhodnocení prototypového dílu.....	58
6 Závěr a doporučení pro další výzkum.....	60
Použitá literatura.....	61
Seznam příloh.....	69

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení technologií 3D tisku [1; 2] .....	15
Obrázek 2 Princip stereolitografie [2] .....	15
Obrázek 3 Metody osvětlování fotopolymeru [2].....	16
Obrázek 4 Princip SLS 3D technologie [2] .....	17
Obrázek 5 Nanášení vrstev materiálu FDM 3D tiskárnou [11] .....	19
Obrázek 6 Konstrukce FDM 3D tiskárny [12] .....	19
Obrázek 7 Řez extruderem [2].....	20
Obrázek 8 Proces 3D tisku.....	21
Obrázek 9 3D skenování pomocí HandySCAN 700 [15].....	22
Obrázek 10 Polygonální síť 3D modelu v STL formátu [16] .....	22
Obrázek 11 3D model „nařezaný“ na vrstvy .....	23
Obrázek 12 Vstupní parametry G-code .....	23
Obrázek 13 Tisková struna PLA na cívce (filament) [18].....	26
Obrázek 14 Pružnost TPE materiálu z 3D tiskárny [27].....	28
Obrázek 15 Bronzefill před a po vyleštění [31].....	29
Obrázek 16 Termosenzitivní červený ABS filament – po zahřátí zbledá [35].....	30
Obrázek 17 UV senzitivní filament [36].....	30
Obrázek 18 3D výtisky připravené na tvorbu formy pro lití metodou ztraceného vosku [40].	31
Obrázek 19 Rozpuštění podpůrného PVA ve vodě [44].....	32
Obrázek 20 Základní způsoby využití 3D tisku v automotive.....	34
Obrázek 21 Rozdělení mechanických zkoušek materiálů [41].....	37
Obrázek 22 Jednoduchý náčrt univerzálního zkušebního stroje [57].....	38
Obrázek 23 Deformační křivky tahových zkoušek polymerů [58].....	38
Obrázek 24 Rozdíl deformací stejných vzorků zatěžovaných různou rychlostí [58] .....	39
Obrázek 25 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [59].....	39
Obrázek 26 3D tiskárna German RepRap X400 PRO v3 [60] .....	39
Obrázek 27 3D model zkušební vzorku v SolidWorks.....	39
Obrázek 28 Naslicovaný zkušební vzorek v PrusaSlicer s detailním pohledem na 100% výplň .....	40
Obrázek 29 Tisk zkušební vzorku na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S .....	41
Obrázek 30 Vyřazený prohnutý vzorek .....	41
Obrázek 31 Shimadzu Autograph AG-Xplus .....	42



Obrázek 32 Zwick Z030 .....	42
Obrázek 33 Měření video průtahoměrem TRViewX (Shimadzu).....	43
Obrázek 34 Měření mechanickým průtahoměrem (Zwick).....	43
Obrázek 35 Kalibrace video průtahoměru TRViewX .....	44
Obrázek 36 Snímané body kalibrační destičky.....	44
Obrázek 37 Lom zkušebních vzorků po tahové zkoušce.....	45
Obrázek 38 Zámek bezpečnostního pásu.....	52
Obrázek 39 Rozříznutý zámek bezpečnostního pásu .....	53
Obrázek 40 Rozebraný zámek bezpečnostního pásu .....	53
Obrázek 41 3D model tlačítka .....	53
Obrázek 42 3D model vnitřního dílu .....	53
Obrázek 43 3D model vnějšího krytu .....	54
Obrázek 44 Sestava dílů v řezu – kontrola kolizí dílů.....	54
Obrázek 45 Kontrola rozměrů .....	54
Obrázek 46 3D model horní části krytu.....	54
Obrázek 47 3D model spodní části krytu.....	54
Obrázek 48 Naslicovaná horní část krytu (Simplify 3D).....	55
Obrázek 49 Naslicovaná spodní část krytu (Simplify 3D) .....	55
Obrázek 50 Vizualizace tisku obou částí krytu (Repetier-Server).....	55
Obrázek 51 Průběh tisku krytu (Repetier-Host) .....	56
Obrázek 52 Snímek z webkamery z průběhu tisku krytu .....	56
Obrázek 53 Naslicované tlačítko (Simplify 3D).....	56
Obrázek 54 Vizualizace tisku tlačítka (Repetier-Host) .....	56
Obrázek 55 Tlačítko těsně po výtisku s podpěrami .....	57
Obrázek 56 Tvar podpěr (Repetier-Host) .....	57
Obrázek 57 Naslicovaný vnitřní díl (Simplify 3D) .....	57
Obrázek 58 2D náhled tisku vnitřního dílu (Repetier-Server).....	57
Obrázek 59 Vytištěné díly zámku bezpečnostního pásu .....	58
Obrázek 60 Složené vytištěné díly.....	58
Obrázek 61 Naslicovaná pružinka vnitřního dílu .....	59
Obrázek 62 Vytištěná pružinka vnitřního dílu.....	59
Obrázek 63 Povrch výtisku po odstranění podpěr .....	59
Obrázek 64 Porovnání tisku na podložku a na podpěry .....	59
Obrázek 65 Závislost kvality povrchu a doby tisku na výšce vrstvy [2] .....	70

Obrázek 66 Ukázka vzorů výplně [2] .....	72
Obrázek 67 Složení FDM 3D výtisku [65] .....	72
Obrázek 68 Nastavení počtu perimetrů (zleva: 2, 3, 5, 7) [66].....	72

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Sady vzorků pro tahové zkoušky .....	41
Tabulka 2 Význačné hodnoty měření sady 1 .....	45
Tabulka 3 Význačné hodnoty měření sady 2 .....	46
Tabulka 4 Význačné hodnoty měření sady 3 .....	47
Tabulka 5 Význačné hodnoty měření sady 4 .....	48
Tabulka 6 Význačné hodnoty měření sady 5 .....	49
Tabulka 7 Význačné hodnoty měření sady 6 .....	49
Tabulka 8 Údaje o 3D tisku dílů .....	58

## Seznam grafů

Graf 1 Predikce velikosti trhu aditivních technologií výroby v automobilovém průmyslu dle SmartTech [47] .....	33
Graf 2 Závislost zatěžovací síly na prodloužení vzorků mezi čelistmi sady 1 .....	45
Graf 3 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 1 .....	46
Graf 4 Závislost napětí na poměrném prodloužení vzorků mezi čelistmi sady 2 .....	47
Graf 5 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 3 .....	48
Graf 6 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 4 .....	48
Graf 7 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 5 .....	49
Graf 8 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 6 .....	50
Graf 9 Srovnání závislosti skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti typických vzorků ze všech sad.....	51

## Seznam zkratek

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
BJ	Binder Jetting (tryskání pojiva)
BVOH	Butenediol vinylalkoholový kopolymer
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)
CNC	Computer Numeric Control (Počítačové číslicové řízení)
CZK	Česká koruna
DLP	Digital Light Processing (Selektivní osvětlování projektorem)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Přímé spékání kovů laserem)
DOD	Drop On Demand
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing (Aditivní výroba elektronovým paprskem)
EBM	Electron Beam Melting (Tavení elektronovým paprskem)
EUR	Euro
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelování pokládáním taveniny)
FFF	Fused Filament Fabrication (Výroba roztaveným filamentem)
HIPS	High Impact Polystyrene (houževnatý polystyrén)
LENS	Laser Engineered Net Shaping
MJ	Material Jetting (Tryskání materiálu)
MJF	Multi Jet Fusion
MSLA	Mask Stereolithography (Selektivní osvětlování pomocí maskovací vrstvy)
PA	Polyamidová vlákna
PC	Polykarbonát

PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyetylentereftalát – glykol
PETT	Polyethylene coTrimethylene Terephthalate
PLA	Polylactic Acid (Polymléčná kyselina)
PP	Polypropylen
PVA	Polyvinylalkohol
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting (Selektivní tavení laserem)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektivní spékání laserem)
TPE	Termoplastický elastomer
TPU	Termoplastický polyuretan
USD	United States dollar (Americký dolar)
UV	UltraViolet (Ultrafialové)

## Úvod

3D tisk, neboli obecně aditivní technologie výroby, zažívají v posledních letech veliký rozvoj. Přesto se na univerzitách a v profesionální sféře s těmito technologiemi pracuje již desítky let, nicméně vývoj byl především zpočátku velmi pomalý a jednalo se více o experimentování nežli o rozsáhlejší reálné využívání v průmyslu. I přes veškeré výhody, které tyto technologie přináší, nebyly dostatečně vyspělé, aby v určitých použitích překonaly metody konvenční. Toto v dnešní době již neplatí, 3D tisk se stal běžnou součástí průmyslu a probíhají do něho větší investice než kdy dříve. Není ovšem snaha ve všech použitích metody konvenční nahradit, protože to pravděpodobně v některých případech ani není možné. O 3D tisku došlo též k většímu rozšíření povědomí a používání i mezi širší veřejností díky výraznému zlevnění FDM metody 3D tisku. 3D tiskárny jsou dnes již běžným vybavením středních průmyslových škol a univerzit, a to často i netechnického zaměření. Zdá se, že 3D tisk se již velmi uchytil a jeho zkoumání je velice aktuální téma.

Motivace na zpracování této bakalářské práce byla právě možnost dozvědět se více o těchto technologiích, jak z hlediska teoretického, tak především z praktického a zkusit navrhnout konkrétní díl, nebo díly, osobního automobilu, na kterém by bylo možné prezentovat přístup od návrhu po realizaci fyzického dílu 3D tiskem. Zároveň na vyhotoveném dílu lze názorně ukazovat možné úpravy v konstrukci dílu a také lépe objasnit např. manažerům firem, jak daný díl prostorově vypadá. Součástí tohoto přístupu je hledání vhodných materiálů pro 3D tisk, aby vyhotovené prototypové díly byly i plně funkční. S tím souvisí např. implementace výpočtového modelování, kdy jako vstupní parametry musí být brány experimenty získané údaje na úrovni inženýrského a skutečného napětí. Proto se tato bakalářská práce zabývá 3D tiskem a experimentálním stanovením vybraných materiálových parametrů. Práce může být vodítkem pro začínající uživatele 3D tiskáren na principu FDM.

# 1 Cíl bakalářské práce

Vzhledem k zaměření bakalářské práce a potřebě rozšiřování znalostí o aplikaci 3D tisku v automobilovém průmyslu a na školícím pracovišti VVCD byl stanoven následující cíl:

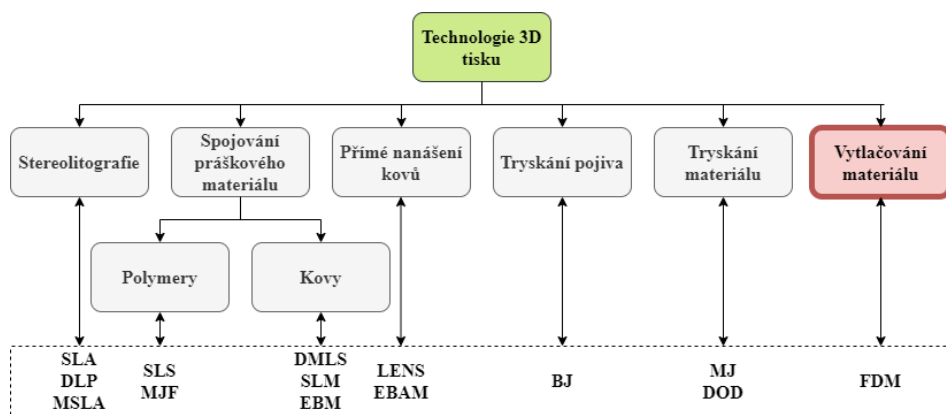
**Navrhnout a 3D tiskem vyhotovit vybraný prototypový díl současně s experimentálním porovnáním mechanických vlastností PLA materiálů.**

Pro dosažení stanoveného cíle je potřebné:

1. Zpracovat aktuální poznatky o technologiích 3D tisku a materiálech na nich tisknutelných s možnostmi využití v automobilovém průmyslu.
2. Vyhotovit v SolidWorks 3D geometrii normovaného tvaru zkušebního vzorku a připravit kód pro 3D tisk.
3. Zhodnotit výsledky mechanických zkoušek v tahu na 3D vytištěných normovaných zkušebních vzorcích z PLA materiálů vybraných výrobců s využitím hodnot skutečného napětí.
4. V programu SolidWorks navrhnout a následně pomocí 3D tisku vyhotovit vybraný automobilový prototypový díl.
5. Zhodnotit prototypový díl a na základě získaných poznatků z práce zformulovat závěry a doporučení pro další výzkum.

## 2 Přehled současných technologií 3D tisku

Výroba 3D tiskem spočívá v postupném přidávání materiálu, čímž se vytvoří požadovaný objekt. Je to tzv. aditivní metoda výroby. Jedná se o opačný postup oproti konvenčním metodám, kde obvykle dochází k vytvoření objektu pomocí postupného odebrání materiálu ze základního polotovaru např. třískovým obráběním. Na obr. 1 je uveden základní přehled současných technologií 3D tisku. Vzhledem k rozsahu odvětví aditivních metod výroby nejsou uvedeny veškeré existující metody, a hlavně i různé variace metod uvedených. Nejpoužívanější metody budou popsány a dále se práce bude zabývat především metodou vytlačování roztaveného materiálu.

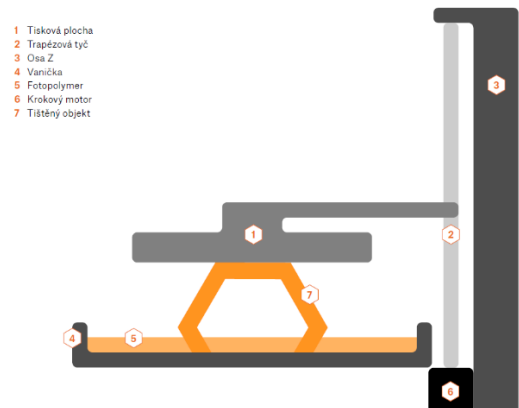


Obrázek 1 Rozdělení technologií 3D tisku [1; 2]

### 2.1 Stereolitografie

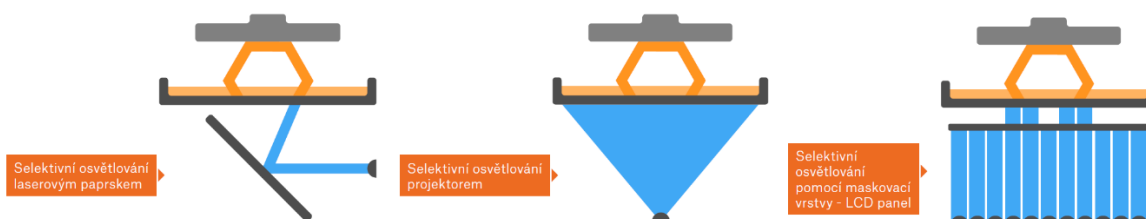
Patent na stereolitografii (SLA) podal Charles Hull a byl schválen roku 1986. Tentýž rok založil v Kalifornii vlastní společnost 3D Systems, která již v roce 1988 uvedla svoji první komerční 3D tiskárnu na světě s názvem SLA-1. Tak se stereolitografie stala první vynalezenou metodou 3D tisku [3].

Princip stereolitografie je znázorněn na obr. 2. Metoda je založena na citlivosti tiskového materiálu v kapalné podobě, tzv. fotopolymeru, na světelné paprsky, který je jimi při tisku vytvrzován. Fotopolymer je umístěn ve vaničce s průhlednou spodní stranou, aby jí mohly procházet světelné paprsky. Tisková plocha je umístěna ve vaničce s materiálem a s pomocí trapézové tyče a krokového motoru je umožněn



Obrázek 2 Princip stereolitografie [2]

její pohyb v ose z. Světelným paprskem je vždy v požadovaných místech vytvrzena jedna vrstva materiálu na tiskové ploše. Poté dojde k posunutí tiskové plochy směrem nahoru v ose z o výšku jedné, právě vytvrzené, vrstvy. Tento proces se opakuje, dokud nejsou vytištěné všechny vrstvy tištěného objektu [2].



Obrázek 3 Metody osvětlování fotopolymery [2]

Osvětlování fotopolymerů pro jejich vytvrzení je v 3D tiskárnách založených na této metodě možné provést několika způsoby (viz. obr. 3):

- **Selektivní osvětlování laserovým paprskem (SLA)**

Laserový UV paprsek řízený zrcadly postupně osvětluje tištěnou plochu dané vrstvy. Doba tisku jedné vrstvy je přímo závislá na velikosti její plochy. Čím větší plocha se v dané vrstvě tiskne, tím déle trvá, než laser postupně všechna tisknutá místa osvětlí. Tisk touto metodou pro větší objekty je časově více náročný oproti následujícím metodám [2].

- **Selektivní osvětlování projektorem (DLP)**

Digitální projektor při tisku každé vrstvy selektivně osvětlí, a tak vytvrdí, celou tištěnou plochu naráz. Doba tisku jedné vrstvy je díky tomu fixní a nezávislá na velikosti tištěné plochy [2].

- **Selektivní osvětlování pomocí maskovací vrstvy (MSLA)**

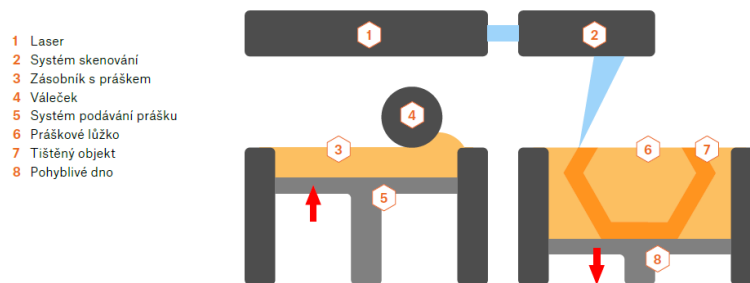
Paprsky je osvětlována celá tisková plocha tiskárny najednou, ale paprskům v cestě brání LCD displej. Paprsky světla prostoupí a vytvrdí fotopolymer pouze v místech displeje, kde jsou aktivní bílé pixely. Od neaktivních černých pixelů se světlo odrazí. Stejně jako u předchozí metody selektivním osvětlováním projektorem je doba tisku jedné vrstvy fixní bez ohledu na velikost tištěné plochy [2].



## 2.2 3D tisk spojováním práškového materiálu

### 2.2.1 Tisk polymerů

Selective Laser Sintering (SLS) je technologie 3D tisku vyvinutá v 80. letech 20. století na Texaské univerzitě v Austinu doktorem Carlem Dekardem a doktorem Joem Beamanem. Podaný patent byl schválen v roce 1992 [4; 5].



Obrázek 4 Princip SLS 3D technologie [2]

Princip 3D tisku technologií SLS je znázorněn na obr. 4. Na pohyblivé dno (8) je pomocí válečku (4) ze zásobníku (3) nanášena tenká vrstva tiskového materiálu v podobě jemného prášku, který je pomocí laseru v místech tištěného objektu spékán. Poté dojde k posunu pohyblivého dna o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje. Ve výsledku je vytištěný objekt zasypán v tiskovém materiálu, který zároveň slouží jako podpora pod tištěnými částmi. Tato metoda 3D tisku se používá především pro tisk z polymerů, ale byla též adaptována na širokou škálu dalších materiálů, jako např. skla, keramika a různé kompozitní materiály [2; 4].

Variací SLS metody je technologie Multi Jet Fusion (MJF) od společnosti HP. Rozdílem je, že prášek není spojen spékáním pomocí laseru, ale nad vrstvou prášku projíždí tisková hlava nanášející na místa tisku látku podporující absorpci infračerveného světla. Poté je celá plocha postupně osvětlena infračerveným světlem a dojde ke spojení prášku v místech nanesení látky v předchozím kroku [6].

### 2.2.2 Tisk kovů

Direct Metal Laser Sintering (DMLS) technologie 3D tisku je v principu totožná s předchozí SLS technologií, ale je uzpůsobena pro tisk ze slitin kovů. Pracuje s práškem kovové slitiny, který je spékán [7].

S čistými kovy umí pracovat technologie Selective Laser Melting (SLM), která má opět stejný princip s předchozími metodami, ale pracuje s vyššími teplotami, a tedy i vyššími

výkony laserů. Zásadní rozdíl oproti předchozí DMLS metodě je, že SLM při tisku roztaví kovový prášek do tekuté formy a jako celek ztuhne [7].

Technologie SLM a DMLS dohromady nabízí širokou škálu kovů a slitin kovů, ze kterých je možné vytvářet 3D výtisky, a to včetně ocelí, nerezových ocelí, hliníku, titanu, slitin niklu a dalších. Výtisky jsou funkční a pevné – vyšší pevnosti dosahuje SLM, protože úplným roztavením kovového prášku vznikne homogenní materiál objektu. Dále je metodami 3D tisku kovů možné vytvořit komplexnější a složitější tvary, které by vytvořit konvenčními metodami buď nebylo možné, nebo příliš složité. Zbytkový nezpracovaný materiál z průběhu tisku je znovupoužitelný. Nevýhodou je, že tisk je velice finančně i časově náročný, výsledné objekty vyžadují další zpracování a v současné době je tisk omezen na relativně malé části. Při tisku v materiálu vzniká zbytkové napětí v materiálu, které může způsobovat kroucení a společně s vysokou hmotností tiskového materiálu oproti SLS tak tisk vyžaduje tvorbu podpěr pod převislými částmi tištěného objektu [1; 7; 8].

Electron Beam Melting (EBM) je obdoba SLM, ale pro tavení materiálu používá elektronový paprsek. V porovnání s předchozími metodami je tento způsob rychlejší a způsobuje menší zbytková napětí v materiálu, což se projevuje menší náchylností k deformování objektu během tisku. Tisk probíhá ve vakuu a je omezen pouze na elektricky vodivé materiály. Kvalita výtisků je horší ve srovnání s DMLS a SLM, ale dokáže tisknout s menším množstvím podpěr [1].

### **2.3 3D tisk vytlačováním materiálu**

Fused Deposition Modeling (FDM) je technologie, na kterou je tato práce primárně zaměřena a bude tudíž zde a následně i v dalších kapitolách rozebrána nejpodrobněji. Ekvivalentně je též označována zkratkou FFF – Fused Filament Fabrication. Počátky této technologie sahají do roku 1989, kdy Steven Scott Crump požádal o patent a později se stal spoluzakladatelem společnosti Stratasys, která v roce 1992 vydala první komerční FDM 3D tiskárnu s názvem 3D Modeler. V dnešní době se jedná o nejrozšířenější technologii 3D tisku, což je dáno především aktuální cenovou dostupností. Toto rozšíření a postupné zlevnění má na svědomí především projekt RepRap založený roku 2004 Adrianem Bowyerem na University of Bath, jehož cílem bylo vytvořit open-source 3D tiskárnu, která je schopná z co největší části sama sebe vytisknout, což se také podařilo. Do projektu se zapojilo a stále na něm pracuje mnoho vývojářů a tiskárny z něho vycházející používá mnoho uživatelů. Open-source znamená, že návod na sestavení tiskárny je veřejně dostupný, každý jej může bezplatně použít

a případně upravit nebo vylepšit. Z tohoto projektu dnes vychází někteří výrobci 3D tiskáren, např. i český Prusa Research s.r.o. [9; 10].

### 2.3.1 Princip FDM 3D tisku

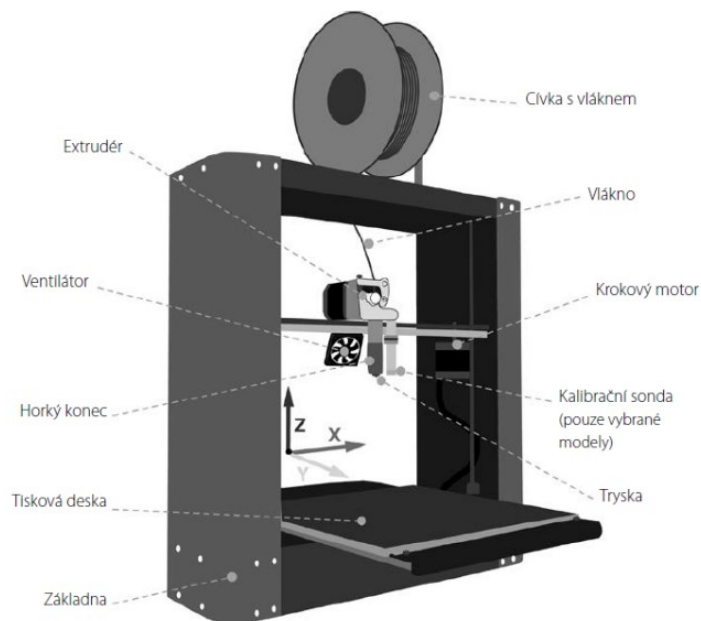
Princip FDM 3D tisku je naznačen na obr. 5. Materiálem tisku je tzv. filament, což je polymerní materiál ve formě tiskové struny, která je tavena a postupně tryskou tiskárny nanášena jako jednotlivé vrstvy [2].



Obrázek 5 Nanášení vrstev materiálu FDM 3D tiskárnou [11]

### 2.3.2 Konstrukční prvky FDM 3D tiskárny a jejich funkce

Konstrukčně se FDM 3D tiskárny dělí na několik typů, především z hlediska pohybu extruderu v tiskovém prostoru na nejběžnější kartézské a dále na delta a polar [2]. Následující popis se týká právě kartézského typu FDM 3D tiskárny, jenž je uveden na obr. 6.

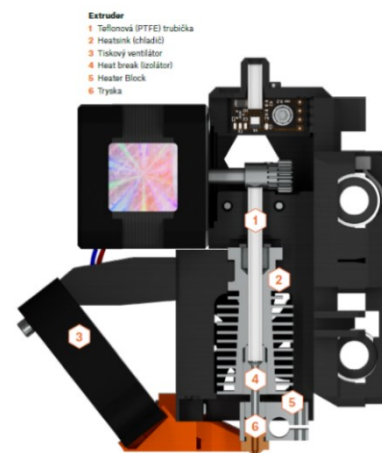


Obrázek 6 Konstrukce FDM 3D tiskárny [12]

Základními částmi jsou extruder (tisková hlava) s tryskou, rám, tisková deska, krokové motory a řídicí jednotka:

- **Extruder (tisková hlava)**

Extruder zajišťuje roztavení a nanášení jednotlivých vrstev materiálu. Na obr. 7 je extruder tiskárny Original Prusa i3 MK3S v řezu. Filament vstupuje za pomoci podávacího mechanismu s krokovým motorem do extruderu teflonovou trubičkou (1) shora a je postupně veden až k ohřívači (5), který taví filament. Ohřívač je vyroben z materiálu dobře vedoucího teplo a je zahříván elektrickým topným tělískem. Obsahuje též čidlo pro měření aktuální teploty. Dále je roztavený materiál v tekuté podobě tryskou (6) nanášen jako jednotlivé vrstvy [2; 12].



Obrázek 7 Řez extruderem [2]

Je důležité zajištění co nejmenší oblasti mezi filamentem v tuhé a tekuté podobě. K tomu slouží chladič teflonové trubičky (2) v místě, kde má mít procházející filament ideálně stále pokojovou teplotu. Izolátor (4) odděluje horní chladnou část s tuhým filamentem a spodní část s již roztaveným filamentem. Tento izolátor je v jednom místě zúžená trubička pro docílení co nejmenšího průřezu tak, aby bylo co nejvíce zamezeno přenosu tepla od ohřívače do chladné části extruderu [2].

- **Základna (rám)**

Základna, resp. rám, je nosný prvek 3D tiskárny do kterého se umisťují všechny ostatní komponenty. Důležitou vlastností rámu je jeho pevnost. Nedostatečně pevný rám může přenášet nežádoucí vibrace a umožňovat nepřesnosti umístění jednotlivých částí tiskárny mezi sebou. Se zvyšující se pevností rámu se vlastnosti tisku zlepšují a je možné docílit rychlejšího tisku bez ztráty kvality. Z tohoto pohledu je nejvhodnější celokovový, konstrukčně správně navržený, rám [2; 12].

- **Tisková deska**

Na tiskovou desku probíhá samotný tisk a vymezuje tak tiskový prostor. Používají se desky různých materiálů. Desky mohou být vyhřívané, které jsou výhodné především pro zamezení kroucení výtisků z materiálů s vysokou tepelnou roztažností. Obecně je důležité zajistit dobré přichycení první tištěné vrstvy k tiskové desce tak, aby nedocházelo k samovolnému oddělování výtisku od podložky během tisku [2; 12].

- **Krokové elektromotory**

Malé krokové elektromotory zajišťují přesný pohyb extruderu a tiskové desky v prostoru. Nejčastěji jsou tyto 3D tiskárny konstruovány tak, že se extruder pohybuje

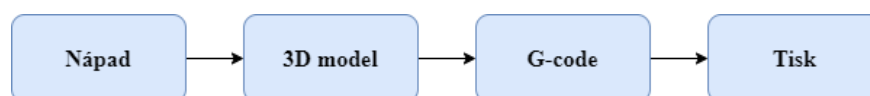
v osách  $x$  a  $z$  a tisková deska v ose  $y$ , ale není to pravidlem. Jeden elektromotor je také umístěn v extruderu, který slouží k podávání filamentu [2].

- **Řídící jednotka**

3D tiskárna je řídicí jednotkou ovládána na základě vstupních dat [2].

## 2.4 Proces 3D tisku

Postup získání fyzického výtisku na 3D tiskárně se skládá z několika základních navazujících kroků (viz. obr. 8), které lze obecně aplikovat na každou technologii 3D tisku, kdy ovšem každá může mít určitá specifika. Zde se bude nadále hovořit výhradně o FDM 3D tisku. V první řadě je třeba získat 3D model požadovaného objektu. Ten je dále nutné připravit pro tisk a vygenerovat pokyny pro tiskárnu v podobě strojového kódu nazývaného G-code. Nakonec je na řadě samotný 3D tisk [2].



Obrázek 8 Proces 3D tisku

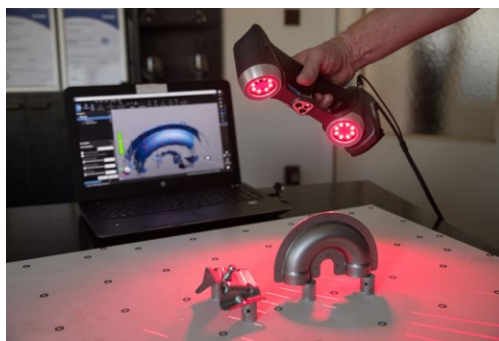
### 2.4.1 Získání 3D modelu

3D model lze získat několika způsoby. Je možné stáhnout si hotový model z některého z dostupných webových portálů, vytvořit si vlastní model v libovolném 3D modelovacím softwaru nebo 3D oskenovat existující objekt [2].

Pro tvorbu 3D modelů existuje rozmanitá nabídka různých 3D modelovacích softwarů. Na výběr je od základních neplacených, jako je např. Tinkercad pro nejzákladnější 3D modelování vhodné pro začátečníky až po náročnější parametrické 3D modelování, především strojních součástí, kde dobře poslouží některý z běžně používaných, obvykle placených, CAD softwarů z této oblasti. Zá zmínku stojí SolidWorks, Autodesk Inventor, Autodesk Fusion 360 nebo CATIA. Parametrické modelování v principu znamená, že se v prostoru tvoří polohou a rozměry přesně definované 2D náčrty, které jsou určitým způsobem tzv. „vytahovány do prostoru“ a vzniká objemové těleso. Pro modelování některých objektů ovšem není parametrické modelování vhodné. Často se jedná o různé umělecké netechnické aplikace, např. modelování postav, ale může se jednat i o modelování různých dílů karoserie automobilů. V takových případech se používá software pracující na jiném principu tvorby modelů, a to tzv. 3D meshe, kdy se modeluje volně v prostoru. Takový přístup volí např. program Blender [2].

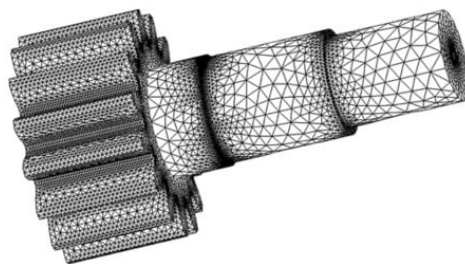
Dalším způsobem získání geometrického modelu pro tisk je 3D skenování, což je technologie, kde je reálný existující objekt převeden na 3D model bez nutnosti modelování. Je

to bezkontaktní technologie snímající tvar povrchu pomocí laseru (viz. obr. 9). Výsledkem skenování jsou milióny bodů, tzv. mračno bodů, které popisují daný předmět. Softwarovým zpracováním jsou data převedena na 3D model. Tato metoda dokáže být velice přesná a často se používá také pro kontrolu rozměrů. Variací této metody je vytvoření 3D modelu z mnoha fotografií určitého objektu z různých úhlů, které jsou následně softwarově zpracovány. Jedná se o tzv. fotogrammetrii. V přechodném řešení je třeba použít drahého specializovaného zařízení, zde oproti tomu stačí fotoaparát, a to i v mobilním telefonu. Nevýhodou je menší přesnost a vysoká cena fotografií zpracovávajícího softwaru. Obecně 3D modely vzniklé skenováním nejsou bezchybné a téměř vždy před případným tiskem vyžadují úpravy [13; 14].



*Obrázek 9 3D skenování pomocí HandySCAN 700 [15]*

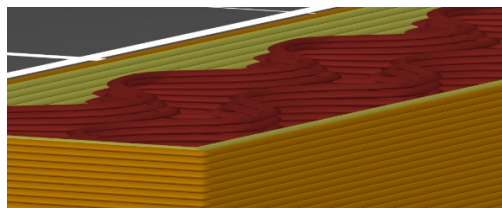
Ať se využije jakýkoliv postup k získání 3D modelu, tak je třeba jej nakonec vyexportovat do formátu, který je podporovaný softwarem pro přípravu k 3D tisku, obecně zvaným slicer, kterým se bude zabývat další kapitola. Formátů existuje několik: STL, OBJ, VRML, AMF nebo nejnovější 3MF. Aktuálně se největší oblibě stále těší již dlouho používaný STL formát. 3D model v STL formátu je definován body v prostoru spojenými do trojúhelníků, které dohromady tvoří polygonální síť popisující celý povrch modelu (viz. obr. 10). Nevýhodou STL formátu je, že neumí nést dodatečné informace o barvě, materiálu nebo fyzické velikosti modelu. Například informace o barvě je nutná v případě vícebarevného tisku a v takovém případě je třeba použít jiný formát, který tuto informaci podporuje [12].



*Obrázek 10 Polygonální síť 3D modelu v STL formátu [16]*

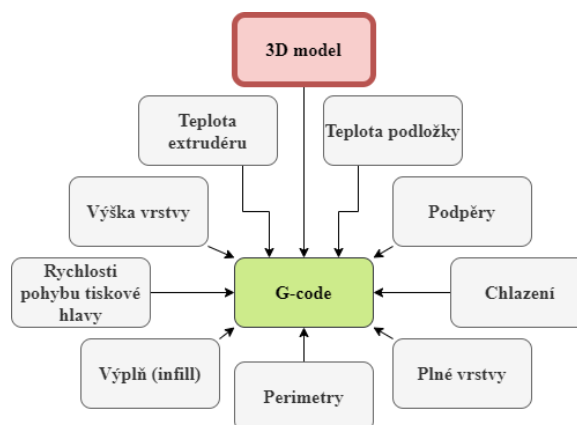
## 2.4.2 Příprava 3D modelu k FDM tisku

Hotový 3D model v STL, nebo případně v jiném vhodném formátu, je nyní nutno k 3D tisku připravit, k čemuž slouží software nazývaný slicer, pomocí kterého se zpracují pokyny k tisku pro 3D tiskárnu v podobě G-code. Slicerů existuje celá řada, jsou to např. Simplify3D, RepetierHost, Ultimaker Cura, Slic3r nebo PrusaSlicer. Někteří výrobci 3D tiskáren dodávají své vlastní slicery, které v sobě mají již implementované profily nastavení pro své tiskárny a konkrétní materiály. Příprava k tisku je tak v mnohých případech velice zjednodušená. Je to případ právě například PrusaSliceru, který je vyvíjen přímo výrobcem 3D tiskáren Prusa Research. Někdy výrobci pouze poskytují přednastavené profily do již zavedených slicerů. Obecně lze ale použít jakýkoliv slicer pro libovolnou 3D tiskárnu [2].



Obrázek 11 3D model „nařezaný“ na vrstvy

Funkce sliceru je v umístění 3D modelu (případně i více modelů) na tiskovou podložku a jeho „nařezání“ na vrstvy tak, jak je bude 3D tiskárna postupně tisknout (viz. obr. 11). Vstupem do sliceru pro vytvoření G-code ovšem není pouze samotný model, ale i další nastavení tisku, jak je uvedeno v diagramu na obr. 12. Tato nastavení ovlivňují průběh tisku, výslednou kvalitu výtisku, ale i třeba úspěšnost výtisku především u materiálů náročnějších na tisk. Jejich stručný popis a jaký význam případně na tisk mají je uveden v příloze A [2].



Obrázek 12 Vstupní parametry G-code

Výsledná kvalita výtisku a doba tisku, případně i samotná úspěšnost tisku, je ve výsledku dána kombinací všech možných nastavení. Uvedený výčet nastavení není kompletní

a další velice detailní nastavení jsou ve slicerech k dispozici. Je třeba si uvědomit, že tisk každého modelu je jedinečný a vždy je možné narazit na nečekané překážky. V nejjednodušším případě je možné použít profil dané 3D tiskárny s konkrétním použitým materiálem, pokud je výrobce vytváří. Potom jsou přednastavené hodnoty již výsledkem dlouhého zkoušení daného materiálu na dané 3D tiskárně a je vysoká pravděpodobnost dosažení dobrého výsledku. Ovšem při použití méně často používaných materiálů, pro které nejsou vytvořeny profily nebo při odlišných požadavcích na tisk, než jaké výrobce zamýšlel, je nutné provádět nastavení tisku vlastní nebo upravovat již vytvořená nastavení tisku. Je možné experimentovat s vyšší kvalitou tisku, kratší dobou tisku při zachování kvality apod. Velice ovlivňujícím faktorem jsou také materiály, protože i totožný materiál od různých výrobců může vyžadovat mírně odlišné nastavení pro tisk.

Kromě jednotlivých nastavení je velice důležitá též konstrukce tištěného 3D modelu a jeho umístění na tiskovou podložku. Na kvalitu a průběh tisku mají tyto faktory veliký vliv. Nejideálnější je tvorba 3D modelu od začátku již s ohledem na to, že bude vyráběn technologií 3D tisku.



### **3 Materiály pro prototypové díly automobilů**

Dostupné spektrum materiálů pro 3D tisk je dnes velice široké a stále v této oblasti probíhá intenzivní vývoj. Nejrozšířenější je 3D tisk z různých druhů polymerů. Důvodem toho je, že z polymerů primárně tisknou právě aktuálně nejrozšířenější FDM 3D tiskárny. Právě konkrétní technologie, na které 3D tiskárna pracuje určuje, z jakých materiálů je na dané tiskárně možné tisknout. Jak již bylo zmíněno v minulých kapitolách, tak existují technologie pro 3D tisk kovů, polymerů a keramických, ale i dalších materiálů. Vzhledem k tomu, že v dalších kapitolách se práce bude zaměřovat výhradně 3D tiskem na FDM tiskárnách, budou již v této kapitole primárně rozebrány materiály použitelné pro tuto konkrétní technologii. Budou uvedeny nejběžněji používané, ale i některé z méně používaných materiálů, které jsou svými vlastnostmi zajímavé.

#### **3.1 Definice prototypu a jeho materiály**

Prototyp lze definovat několika způsoby. Ve fázi vývoje je prototypový díl takový, který ještě není ve všech ohledech zcela dokončený, ale má některé nebo všechny vlastnosti finálního produktu. Později může existovat díl nazývaný též jako prototyp, který je ale již dokončený a slouží jako ideální vzor pro všechny další, již sériově vyráběné kusy, daného dílu. Z dalšího pohledu je prototyp již obvykle kompletně funkční výrobek (např. automobil), který prezentuje nový design nebo koncepci. Takový koncept se do sériové výroby ani nemusí dostat a pokud ano, tak obvykle ještě prochází úpravami [17].

Při návrhu výroby prototypového dílu je vždy důležité určit jeho účel, jaké vlastnosti jsou od něho očekávány a kolik času a financí je možné do prototypu investovat. Podle toho se zvolí nejvhodnější materiál a technologie výroby. V určitých případech může být prototyp funkční díl, který musí splňovat určité mechanické, případně i jiné, vlastnosti, ale někdy se může jednat pouze o prototyp z hlediska designu u kterého může být naopak přednější výsledný vzhled povrchu.

#### **3.2 Materiály pro FDM 3D tisk**

Pro FDM 3D tiskárny se používá tiskový materiál v tuhém stavu v podobě struny navinuté na cívce, tzv. filament. (viz. obr. 13) Standardizovanými průměry strun jsou 2,85 mm a 1,75 mm, která je běžněji používaná [12].



*Obrázek 13 Tisková struna PLA na cívce (filament) [18]*

### **3.2.1 PLA**

Polylaktid (PLA) patří společně s ABS (bude zmíněno později) k nejpoužívanějším materiálům 3D tisku metodou FDM. Je to termoplastický polyester vyráběný z kukuřičného nebo bramborového škrobu, což mimo jiné zaručuje jeho biologickou odbouratelnost. Z hlediska tisku je nenáročný a vhodný pro začátečníky. Oproti ostatním materiálům má nízkou teplotní roztažnost, což v praxi znamená, že při tisku nemá velkou tendenci se kroutit, odlepovat od podložky nebo prskat. Z toho důvodu je dobře použitelný i pro tisk relativně velkých částí. Další výhodou je možnost detailního tisku a relativně hezkého povrchu i v místech převisů nebo podpěr. Největší slabinou PLA je, že začíná měknout již při teplotě 60 °C. To omezuje jeho použití v místech vysokých teplot, např. i v interiéru vozidla na přímém slunci může teplota vzduchu na takto vysoké hodnoty dosáhnout. Z hlediska pevnosti má skvělé vlastnosti, ale je křehký a při mechanickém namáhání může prasknout. Je málo odolný proti povětrnostním vlivům. Patří k nejlevnějším materiálům pro 3D tisk a nabízí se ve velice široké škále různých barev. Tisková teplota PLA se pohybuje v rozmezí mezi 180 °C a 230 °C. Tento materiál nevyžaduje nutně vyhřívanou podložku, ale pokud je k dispozici, tak se používá její teplota až 60 °C. Zajímavostí je, že je možné při tisku docílit lesklého i matného povrchu nastavením teploty. Při teplotě tisku do 225 °C bude povrch lesklý, nad 225 °C bude povrch matný [2; 19; 20].

### **3.2.2 ABS**

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je termoplastický polymer hojně používaný pro FDM 3D tisk. V porovnání s předchozím PLA má nižší pevnost, ale je mnohem odolnější vůči mechanickému poškození, např. proti nárazům. Dále má ABS lepší odolnost proti nízkým, a hlavně také proti vysokým teplotám. Začíná měknout až při teplotě 105 °C. Jeho výhodou je též odolnost proti chemikáliím. Tisk ABS probíhá při teplotě 220 °C až 250 °C a vyhřívaná podložka je vyžadována, protože tento materiál má velké sklony ke kroucení a odlepování od

podložky. Tisk je náročnější než při použití PLA materiálu. Detailní tisk je z ABS možný, ale po vychladnutí mohou vznikat nepřesnosti vzhledem k vysoké smršťitelnosti po zchladnutí. Při tisku vzniká nepříjemný a potencionálně škodlivý zápach, proto je vhodné tisknout v komoře nebo v dobře větraných místnostech. Ve spojení s ABS se často používá aceton pro lepení nebo jeho výpary pro vyhlazování povrchu výtisku [2; 21; 22; 23].

Vývojem vedle ABS vzniknul nový podobný materiál akrylonitryrenakryl (ASA). Mnoho vlastností má podobných, některé lepší. Vyznačuje se vysokou odolností proti UV záření a vzhledem k menší tepelné roztažnosti oproti ABS se lépe tiskne. Na druhou stranu tisk probíhá za vyšších teplot [2; 24].

### **3.2.3 PETG**

Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem (PETG) vychází z klasického polyethylentereftalátu (PET), který patří obecně mezi nejpoužívanější polymery (např. PET lahve). Přidaný glykol dělá z klasického PET čistší, méně křehký a použitelnější materiál pro 3D tisk. PETG kombinuje výborné mechanické vlastnosti ABS s jednoduchostí tisku PLA. Jedná se tedy o pevný materiál odolný proti mechanickému poškození s dobrou odolností proti vysokým teplotám. PETG začíná měknout při teplotě 88 °C. Při tisku je dobrá přilnavost první vrstvy k podložce a málo se kroučí nebo odlepuje. Stále se ale jedná o mírně náročnější tisk ve srovnání s PLA. Tisk PETG probíhá při teplotách 220 °C až 250 °C ideálně s vyhřívanou podložkou, ale není naprostou nutností. Je možné se setkat s dalšími variantami PET materiálu, např. PETT oblíbený pro svou průhlednost nebo PETG s přídavkem uhlíkových vláken pro zvýšení pevnosti [25].

### **3.2.4 TPE**

Termoplastické elastomery (TPE) je skupina flexibilních materiálů tisknutelných na FDM 3D tiskárnách. Výtisky jsou ohebné, jednotlivé vrstvy jsou soudržné a některé jsou i elastické. Je možné se také setkat s výrazem termoplastický polyuretan (TPU), což je již konkrétní termoplastický elastomer. V marketingu při prodeji filamentů se výrazem TPU označují tužší materiály oproti TPE. Z hlediska tisku jsou tyto flexibilní materiály velice náročné. Jsou náchylné na kroucení a odlepování od podložky a samotný tisk musí probíhat při velice malých rychlostech pohybu tiskové hlavy. Při přejezdech za sebou často tryska zanechává vlásečnicové zbytky materiálu. Použití lze nalézt např. u obalů na elektroniku nebo pneumatiky modelů aut (viz. obr. 14) [26; 27].



Obrázek 14 Pružnost TPE materiálu z 3D tiskárny [27]

### 3.2.5 PA

Polyamid (PA), jinak zvaný nylon, je termoplastický polymer vhodný pro tisk funkčních částí jako jsou ozubená kola. Je to dáno jeho vysokou pevností, odolností, a hlavně nízkému součiniteli tření. Tenké výtisky jsou ohebné. Procesem tisku se řadí mezi náročnější materiály. Velice dobře absorbuje vzdušnou vlhkost a tak se doporučuje filament z tohoto materiálu před tiskem vysušit. Případná vlhkost způsobuje špatnou adhezi na podložku a také mezi dalšími jednotlivými vrstvami materiálu. Při tisku z nedostatečně suchého materiálu se tvoří hrubý povrch. Časté je kroucení nylonu při tisku a jeho odlepování od podložky, proto je u tisku tohoto materiálu třeba mít podložku vyhřívanou, a to až na 90 °C. Tisková teplota se pohybuje mezi 220 °C až 270 °C [28].

### 3.2.6 PC

Polykarbonáty (PC) jsou transparentní polymery význačné svou vysokou pevností, tuhostí a odolností vůči vysokým teplotám až do 135 °C. Tisk z PC je náročný, protože pro vytlačení materiálu tryskou jsou třeba velice vysoké teploty až 300 °C, během tisku se deformuje a při chladnutí smršťuje. Stejně jako nylon absorbuje vzdušnou vlhkost, která negativně ovlivňuje průběh tisku a je třeba materiál před tiskem vysušit [29].

### 3.2.7 PP

Polypropylen (PP) je průhledný termoplastický polymer, který je lehký a pevný zároveň. Zajímavou vlastností je jeho odolnost vůči únavě, což se vyznačuje jeho ohybatelností. Mezi další přednosti patří odolnost vůči chemikáliím a těsnicí vlastnosti. Z hlediska tisku patří k náročným materiálům, protože je velice složité jeho přichycení na tiskovou podložku [30].

### 3.2.8 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou složeny z některého ze standartních polymerů s přísadou v podobě prášku různých jiných materiálů, např. dřeva (woodfill), mědi (cooperfill), bronzu (bronzefill), uhlíku a dalších. Cílem použití těchto materiálů je nejčastěji dosažení určitého vzhledu povrchu. Například použitím bronzefillu a následným vyleštěním po výtisku je možné

dosáhnout lesklého bronzového povrchu (viz. obr. 15). Materiály s těmito přísadami jsou velice abrazivní, a tak opotřebovávají trysku tiskárny mnohem rychleji než běžný materiál. Vhodné je použití vytvrzené trysky [2].



Obrázek 15 Bronzefill před a po vyleštění [31]

### 3.2.9 Materiály se speciálními vlastnostmi

V této kapitole budou uvedeny různé druhy materiálů filamentů se speciálními vlastnostmi, které jsou obvykle docíleny tím, že se standartní tisknutelné polymery modifikují určitými přísadami.

- **Elektricky vodivé filamenty**

Elektricky vodivé filamenty se skládají ze základního nosného polymeru s přídavkem uhlíku. Nosnými polymery mohou být nejběžněji používané PLA nebo ABS, ale také specializovanější materiály jako TPU nebo HIPS. Již byl v této práci uhlík zmíněn jako přísada do filamentu pro zvýšení tuhosti a pevnosti, nicméně v těchto případech byl jeho obsah tak malý, že nedokázal vést elektrický proud. Pro elektrickou vodivost je obsah uhlíku ve filamentu třeba mnohem vyšší s atomy v krystalické struktuře s volnými elektrony vedoucími elektrický proud. Propustnost takových materiálů je ale o mnoho nižší oproti standartním vodivým materiálům jako je například měď. Aktuálně tyto filamenty nejsou moc rozšířené a nabízí je pouze několik výrobců za vysoké ceny [32].

- **Feromagnetické filamenty**

Výtisky z feromagnetických materiálů jsou magneticky přitažlivé, ale sami o sobě se jako magnety nechovají. Této vlastnosti se dosahuje přidáním jemného železného prášku do základního materiálu. Aktuálně se na trhu jako takový materiál nejvíce využívá PLA. Tisk je tím pádem velice podobný klasickému PLA a není náročný. Tyto materiály se dají použít pro tisk statorů malých elektromotorů, akčních členů a magnetických senzorů různých systémů nebo samozřejmě dalších různých aplikací, kde je možné tohoto magnetismu využít [33].

- **Termosenzitivní filamety**

Termosenzitivní filamety jsou takové, které mění svou barvu v závislosti na teplotě. U každého takového filamentu je udávána teplota, kdy dochází ke změně barvy. Tyto teploty se u jednotlivých filamentů liší, ale často se pohybují okolo 30 °C. Znamená to, že při pokojové teplotě má určitou barvu a při zahřátí nad uvedenou teplotu se původní barva změní na jinou (viz. obr. 16). Po ochlazení se opět vrátí původní barva a jedná se tak tady o změnu vratnou. S takovými vlastnostmi se na trhu objevují PLA a ABS filamety mající téměř stejné vlastnosti tisku jako standardní bez této termosenzitivní vlastnosti [34; 35].



*Obrázek 16 Termosenzitivní červený ABS filament – po zahřátí zbělá [35]*

- **UV senzitivní filamety**

Tyto filamety stejně jako předchozí mění svoji barvu, nicméně ne v závislosti na teplotě, ale po vystavení UV záření, resp. slunečnímu svitu (viz. obr. 17) [36].



*Obrázek 17 UV senzitivní filament [36]*

- **Samozhášivé filamety**

Samozhášivé filamety jsou takové, které mají schopnost odolávat šíření plamene. Pro různé užití je samozhášivost specifikována konkrétními normami, které se obvykle u samozhášivých filamentů uvádí. Na trhu se vyskytují s takovými vlastnostmi ABS a PET-G filamety. Oblíbeným použitím je tisk krabiček elektronických zařízení, ale obecně je vhodný všude, kde je zvýšené riziko požáru. Samozhášivé materiály nejsou nehořlavé. Začnou hořet, ale po odstranění tepelného zdroje plamen samovolně zhasne [37; 38; 39].

- **Filamety pro přípravu forem**

Zajímavým materiálem pro FDM 3D tisk je materiál pro přípravu forem na lití kovů metodou ztraceného vosku. To je metoda, kdy se vytvoří vzor požadovaného objektu k lití z vosku, na který se následně nanáší vrstvy keramického materiálu pro

vytvoření formy. Následně je vosk roztaven a z formy v tekuté podobě vylit. V tu chvíli je forma připravena pro lití kovů do její dutiny. Pro vyndání ztuhlého kovového odlitku z formy je nutné formu rozbít. Právě zmíněný filament má podobné vlastnosti používanému vosku u této metody lití a může ho tak pro vytváření forem nahradit (viz. obr. 18). Z tohoto filamentu se tiskne podobně jednoduše jako z PLA a oproti klasickým voskovým vzorům 3D tisk umožňuje vytvořit složitější objekty pro odlévání jednodušší cestou. Pro malé série kovových odlitků je 3D tisk levnější alternativou oproti výrobě nástroje pro výrobu požadovaných voskových vzorů [40; 41].



*Obrázek 18 3D výtisky připravené na tvorbu formy pro lití metodou ztraceného vosku [40]*

- **Antistatické filamenty**

Při tisku elektronických komponent, kde hrozí riziko poškození elektrostatickým výbojem je vhodné použít antistatický filament. Dodává se jako modifikovaný ABS materiál karbonovými nanotrubicemi s označením ABS/ESD. Vyznačuje se vysokými hodnotami elektrického odporu a předchází tak poškození elektronických obvodů [42].

- **Filamenty svítící ve tmě**

Filamenty svítící ve tmě jsou opět klasické PLA nebo ABS materiály s přísadou některého fosforeskujícího materiálu (nejčastěji se jedná o hlinitan strontnatý), který absorbuje energii ultrafialového záření ze světelných zdrojů. Tuto absorbovanou energii poté emitují zpět do prostředí ve formě světla, nicméně v menší intenzitě. Využití je často pouze pro zajímavý efekt, nicméně se materiály svítící ve tmě mohou používat jako bezpečnostní prvky, např. některé hasičské helmy nebo ukazatele únikových východů mají tuto vlastnost [43].

Lze najít další různé materiály, které mají nějakou speciální vlastnost a také dále probíhá jejich vývoj a další tedy budou přibývat. Společné faktory těchto materiálů často jsou, že se skládají z některého standardního polymeru pro 3D tisk s přísadami pro dosažení konkrétní

vlastnosti, jsou dražší oproti standardním materiálům a tisk bývá náročnější oproti standardnímu materiálu ze kterého speciální filament vychází.

### 3.2.10 Pomocné materiály

Jako pomocné materiály jsou myšleny materiály, které se při tisku používají jako podpěry pod převislými částmi modelu, tak aby byl objekt vytisknutelný. U tiskáren pracujících pouze s jedním filamentem se podpory tisknou ze stejného materiálu jako samotný výtisk. Mezi podporou a tištěným objektem je třeba nechat malou mezeru, aby se podpora s výtiskem úplně nespojila, ale přesto výtisk podržela a bylo jí možné po dokončení tisku odlomit. Pokud umí tiskárna pracovat alespoň se dvěma filamenti najednou, tak je možné podpory tisknout z materiálů jiných, než je tištěný objekt. V takovém případě se používají filamenti po výtisku rozpustitelné v určitých látkách, takže se objekt tiskne přímo na podporu, která se po dokončení tisku rozpustí. Tím se dosáhne lepšího povrchu výtisku v místě podpory, než tomu bylo u tisku podpor i objektu ze stejného materiálu [2].

Je vhodné používat materiál podpory takový, který má podobné teploty tisku jako materiál základní. Pro PLA se z toho důvodu používají podpory z butenediol vinylalkoholového kopolymeru (BVOH) nebo z polyvinylalkoholu (PVA), které jsou po výtisku rozpustitelné ve vodě, jak je ukázáno na obr. 19. Při tisku z ABS se používá na podpory houževnatý polystyrén (HIPS), který je rozpustný lemonsolím. Cena těchto podpůrných materiálů obvykle převyšuje cenu materiálu tištěného objektu [2].



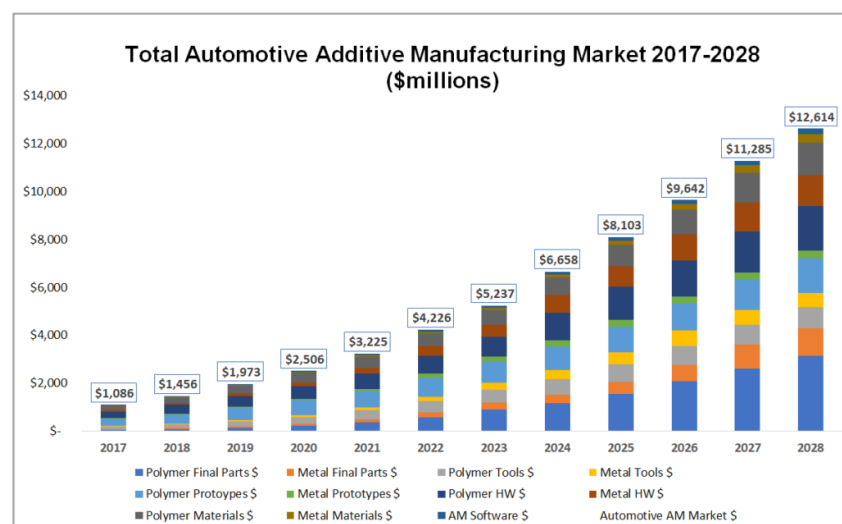
Obrázek 19 Rozpuštění podpůrného PVA ve vodě [44]

Uvedené materiály v této kapitole se používají primárně právě jako podpory, nicméně je lze použít i jako každý jiný tiskový materiál, pokud vyhoví požadovaným vlastnostem výtisku.



## 4 Aplikace FDM 3D tiskárny

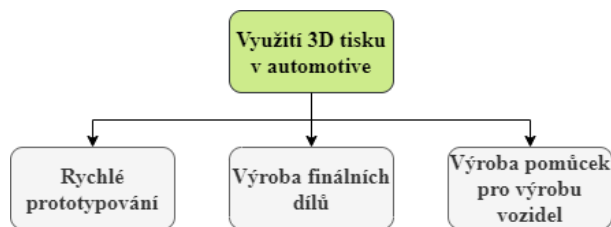
Úvodem této kapitoly je dobré zmínit, že 3D tisk různými technologiemi je v průmyslu aplikován již od ranných fází existence těchto technologií výroby. Konkrétně automobilový průmysl je jedním z nejvíce inovativních odvětví, kde se tyto aditivní technologie výroby začaly používat a stále používají. Již v roce 1988 společnost Ford koupila třetí 3D tiskárnu, která kdy byla na světě vyrobena. V automobilce BMW začali s 3D tiskem pracovat roku 1990. Toto jsou některé příklady automobilových společností, které se staly průkopníky v testování a implementování těchto technologií do procesu vývoje a výroby vozidel. Právě investice jak financí, tak i obrovského množství času, do vývoje aditivních technologií výroby těchto velkých společností pomohly dostat tyto technologie do dnešní podoby, kdy se jedná o běžně používanou technologii využívanou většinou významných automobilek a také dalších průmyslových odvětví. Dle analýzy společnosti SmartTech trh automobilové aditivní výroby v roce 2017 vygeneroval 1,1 miliardy USD a v roce 2028 by se částka dle odhadu studie mohla vyšplhat na téměř 13 miliard USD, což je ve srovnání s rokem 2017 více než 1100 % nárůst (viz. graf 1). Znamená to tedy, že tento segment má dle automobilek potenciál a budou jej dále intenzivně rozvíjet. Kromě automobilového průmyslu se významně aditivních technologií využívá v průmyslu medicínském, leteckém a kosmonautice, ale i dalších. Jednotlivé obory mají ovšem různé specifické požadavky, a tak pokrok aditivní výroby v určitém průmyslovém odvětví nemusí být vždy zásadní pro odvětví jiné [45; 46; 47].



Graf 1 Predikce velikosti trhu aditivních technologií výroby v automobilovém průmyslu dle SmartTech [47]

### 4.1 Aktuální využití a budoucnost 3D tisku v automobilovém průmyslu

Při vývoji a výrobě vozidel jsou tři základní oblasti uvedené v diagramu na následujícím obr. 20, kde se 3D tisku využívá.



Obrázek 20 Základní způsoby využití 3D tisku v automotive

Při pohledu zpět na graf 1 lze vidět podíl jednotlivých výše uvedených oblastí. Do roku 2020 je primárně zastoupen 3D tisk prototypových polymerových dílů. V následujících letech je ovšem odhadován strmý nárůst výdajů v oblasti výroby finálních dílů 3D tiskem, a to především z polymerů, ale také z kovů. Nárůst výdajů v 3D tisku prototypů v následujících letech je, nicméně minoritní. Znamená to, že 3D tisk ve vývoji silničních vozidel je již značně využíván a aktuální snaha automobilek směřuje především k implementaci těchto aditivních technologií ve finální výrobě vozidel.

#### 4.1.1 Rychlé prototypování

Rychlé prototypování představuje moderní metodu vytváření fyzických prototypových dílů pomocí aditivních technologií z počítačově vytvořených 3D modelů. Takto vytvořené prototypové díly mohou představovat pouze design určité součásti, některé vybrané vlastnosti finálního dílu anebo rovnou díl se všemi požadovanými vlastnostmi finálního dílu. Je tedy možné otestovat vlastnosti nebo design z hlediska funkčnosti i vzhledu v závislosti na požadavcích. V raných fázích vývoje je s výhodou možné fyzicky vytvořit několik návrhů jednoho dílu, které se porovnají a zvolí se nejvhodnější [48].

Právě do oblasti rychlého prototypování přinesl 3D tisk úspory časové i finanční. Výroba prototypů konvenčními metodami je časově a finančně náročná. Použitím 3D tisku se obvykle docílí snížení nákladů na jejich výrobu, a to i přes to, že variabilní složka nákladů na výrobu jednoho kusu je mnohem vyšší než u metod konvenčních, což je dáno především vyššími náklady na materiály pro 3D tisk a na pracovní sílu vzhledem k nižší automatizaci. Fixní náklady na nákup hardwaru pro 3D tisk jsou obvykle také vysoké, především pro tisk kovů (např. SLS nebo SLM), ale obrovskou výhodou je, že tiskárna není určena pro výrobu pouze jednoho konkrétního dílu, jako tomu je např. v případě forem pro lití. Znamená to tedy, že během své životnosti je tiskárna schopná vyrobit mnoho různých (prototypových) dílů, čímž se fixní náklady vyplatí investovat [49].

Nespornou výhodou 3D tisku je možnost rychlých úprav dílů a jejich zkoušení na fyzických modelech v krátkém čase od provedení úpravy. Například je tedy možné při zkoušení

vlastností karoserie vozidla v aerodynamickém tunelu mít několik vyrobených dílů různých tvarů a zkoumat na reálné karoserii, jaký vliv budou jednotlivé díly mít na aerodynamiku. Případný nápad na další úpravu je velmi rychle realizovatelný.

Pro tisk prototypů je právě práce zabývající se metoda FDM 3D tisku velice výhodná. Jedná se o jednu z nejlevnějších možností 3D tisku, která zároveň přináší na výběr velice široké spektrum tisknutelných materiálů dle požadavků na výtisk (viz. kapitola 3).

#### 4.1.2 Výroba finálních dílů

Kvalita a rychlost výroby aditivními technologiemi stoupá, a tak se začínají využívat i na výrobu finálních dílů. V dnešní době se jedná o velmi malou část finální výroby, ale jak bylo již zmíněno, tak se bude produkce velmi pravděpodobně v tomto směru navyšovat.

U konvenčních metod výroby, jako je výroba litím nebo lisováním, je obrovský fixní prvotní náklad na nákup strojů a výrobu forem. Následně je variabilní složka nákladů velmi nízká a jeden vyrobený kus je velice levný, nicméně je třeba vyrobit určité, obvykle velmi vysoké, množství kusů, aby se fixní náklady vyplatili do této metody výroby investovat. To je dáno také tím, že drahá vyrobená forma je pouze na výrobu jednoho konkrétního dílu. Při jakékoliv úpravě dílu by byla třeba vyrobit forma nová. Velmi nízké náklady při výrobě velkého počtu kusů je základní požadavek pro velkosériovou výrobu, kterou zatím nejsou aditivní technologie schopny splnit, a proto v tomto směru stále převládají konvenční metody výroby [49].

Zde je pár příkladů, kde se 3D tisk ve výrobě finálních dílů využívá:

- Vodící lišta okna z nylonu a držák krytu skládací střechy z hliníku (BMW i8 Roadster) [50; 51]
- Brzdový třmen z titanu (Bugatti Chiron) [52]
- Držáky zadních parkovacích senzorů (Jaguar XE SV Project 8) [53]

Z několika výše uvedených příkladů současného využití 3D tisku na výrobu finálních dílů automobilů je zřejmé, že se zatím jedná o segment prémiových vozů s malým počtem vyrobených kusů. Pro velkosériové počty vyrobených kusů automobilů jsou tyto metody výroby zatím nevýhodné z hlediska rychlosti výroby i ceny za vyrobený jeden kus dílu.

Ve velice pokročilém stavu jsou v tomto směru již v automobilce BMW, kde právě zmíněného modelu i8 bylo mezi lety 2014 až 2020 prodáno více než 20000 kusů, což již nelze považovat za vyloženě malosériovou výrobu i přesto, že existují modely vozů, kterých se vyrobí

mnohonásobně více. Tento model, ale i model i3 v této modelové řadě, jsou od začátku vývoje v BMW pojaty jako futuristické modely představující nejnovější technologie. Již v roce 2014, kdy byl počátek prodeje těchto automobilů, se jednalo o částečně elektrické vozy, tzv. plug-in hybridy. Futurističnost a testování nových technologií na tomto voze přineslo také právě využívání 3D tisku finálních dílů v BMW. Dle jejich slov jsou dnes schopni vytisknout více než 100 kusů zmíněných vodících lišt oken během 24 hodin nebo, že 3D tisk držáku krytu skládací střechy umožnil snížení hmotnosti současně se zvýšením pevnosti [51; 54].

Speciálním segmentem výroby finálních dílů jsou díly náhradní, a to především pro málo se vyskytující vozidla. Patří sem veteráni nebo i mladší automobily s velice nízkou produkcí. Automobilky Mercedes-Benz nebo Volkswagen pro tyto účely 3D tisk využívají [52; 55].

Uvedené příklady 3D tisku byly voleny tak, aby ukazovaly, že se 3D tisku využívá, a to v různých oblastech a za použití různých technologií 3D tisku. Může se tak jednat o velice mechanicky i tepelně namáhané kovové součásti, jako je zmíněný titanový brzdový třmen, nebo o méně namáhané držáky a další součásti z různých druhů polymerů nebo kovů. Spektrum možností je velice široké. Konkrétně FDM 3D tisk určitě nemůže nalézt využití pro tepelně namáhané součásti brzd nebo motoru vzhledem k pro tyto účely nízké teplotě tavení používaných materiálů, na které je samotná metoda FDM 3D tisku založena.

Větší nasazení 3D tisku do sériové výroby automobilů by mohlo do budoucna změnit smýšlení tradičních společností, které stále v dnešní době často vyrábí po určitou dobu jeden modelový rok vozu, poté se provedou různé úpravy a vylepšení a začíná se vyrábět nový modelový rok. Změna by mohla spočívat v tom, že by se případné úpravy daly implementovat do výroby okamžitě a bez dodatečných nákladů např. na výrobu nových forem. Dále by také toto mohlo přinést větší možnosti customizace vozů pro zákazníky.

Dalším možným využitím 3D tisku v automobilovém průmyslu se zvyšující se oblibou FDM 3D tiskáren i v domácnostech nabízí možnost prodeje některých náhradních dílů a příslušenství v podobě modelu / G-code pro 3D tisk, který by si zákazník zakoupil přes internet a sám vytisknul. Podobného principu by se mohlo též využívat v autoservisech, kdy by právě náhradní díly tisknuly dle potřeby a nebylo by nutné mít skladové zásoby nebo čekat na dodání. V takovém profesionálním použití by se mohly objevovat i 3D tiskárny např. pro tisk kovů, což jsou technologie vyžadující vysokou investici.

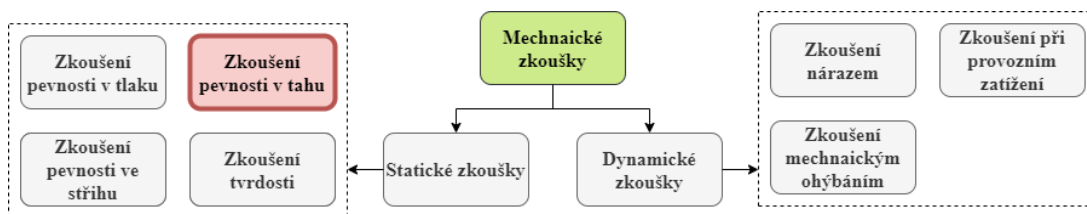
### 4.1.3 3D tisk pomůcek pro výrobu vozidel

Na výrobních linkách, kde se vozy skládají, pracovníci používají různé specifické kovové nástroje a pomůcky vyráběné na CNC obráběcích strojích. Takové nástroje se používají opakovaně stále stejným způsobem a může docházet k jejich prasknutí únavovou trhlinou. Následné nahrazení takového nástroje pomocí CNC stroje je nákladné a zdlouhavé. Technologie FDM 3D tisku zpracovává termoplasty, které se vyznačují vysokou pevností (např. nylon), a jsou tak také vhodné pro výrobu těchto pomůcek. Dále je jejich FDM 3D tisk rychlejší a levnější. V případě rozbití tedy není jejich rychlé nahrazení problémem. Zásadní výhodou je také redukce hmotnosti těchto pomůcek díky lehčím materiálům a možným konstrukčním úpravám na CNC strojích nevyrobitelných. Samozřejmě též 3D tisk přispěje k vyšší ekologičnosti vzhledem k minimálnímu odpadu z výroby. Jednou ze skupin vyráběných pomůcek jsou i kontrolní měřidla, protože 3D výtisky disponují pro toto použití dostatečnou přesností [56].

Je to cesta k ušetření nákladů, kratším prostojům při rozbití nástroje a také k menší zátěži pracovníků vzhledem k obvykle nižší hmotnosti.

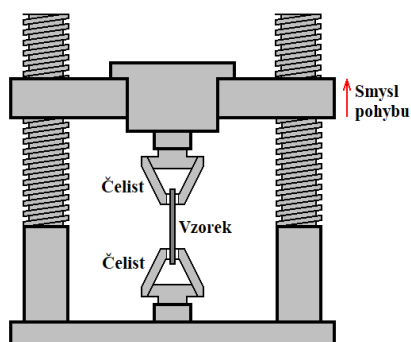
## 4.2 Experimenty – tahové zkoušky PLA filamentů

Pro zjišťování mechanických vlastností materiálů, které jsou důležité znát při aplikaci daného materiálu, existují standardizované zkoušky. Z podstaty zkoušek lze zkoušky rozdělit na dynamické a statické. Při dynamických zkouškách se materiál testuje zatížením rychle vznikajícím, rázovým nebo střídavým. Mechanické zkoušky statické probíhají při zatížení konstantním nebo s velmi pomalu se měnícím zatížením, tzv. kvazistatickým. Rozdělení těchto zkoušek je uvedeno v diagramu na obr. 21 [41]. Dále se práce bude zabývat pouze statickou zkouškou pevnosti v tahu, kde budou provedeny experimenty na PLA filamentech.



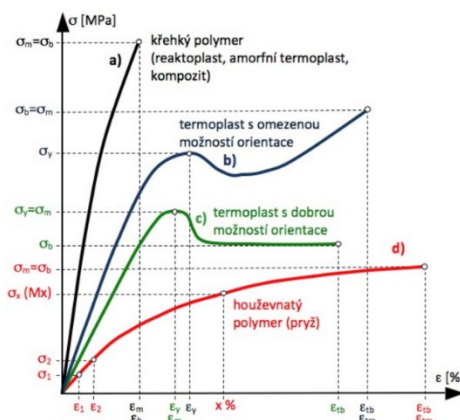
Obrázek 21 Rozdělení mechanických zkoušek materiálů [41]

Tahovými zkouškami se určuje pevnost materiálu v tahu na zkušebních vzorcích plochého nebo tyčového tvaru dle příslušné normy a provádí se na univerzálních zkušebních strojích. Vzorek se upne do čelistí stroje, jak je naznačeno na obr. 22, které se od sebe následně oddalují konstantní rychlostí až do přetržení vzorku, což představuje konec zkoušky. Zaznamenává se zatěžovací síla  $F$  v závislosti na prodloužení vzorku  $\Delta L$  [41].



Obrázek 22 Jednoduchý nákres univerzálního zkušebního stroje [57]

Z naměřených hodnot se sestavuje především tzv. smluvní tahový diagram (resp. deformační křivky), který reprezentuje závislost napětí ve vzorku na jeho prodloužení. Ve smluvním diagramu se vyskytuje tzv. smluvní / inženýrské napětí, které se vztahuje k výchozímu průřezu vzorku. Je-li známo, jak se měnil průřez vzorku během zkoušky, je možné určit též průběh napětí skutečného. Tvar dané deformační křivky vypovídá o pevnosti materiálu a jeho houževnatosti, případně křehkosti. Typické příklady deformačních křivek polymerů jsou uvedeny na obr. 23 [41].

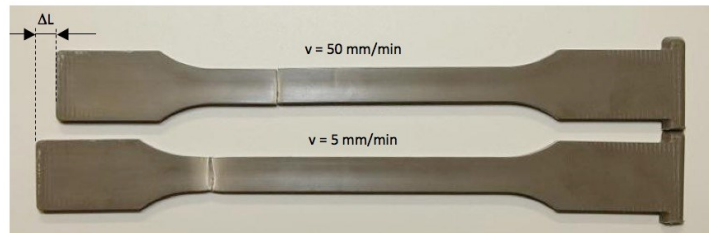


Obrázek 23 Deformační křivky tahových zkoušek polymerů [58]

Jednotlivé parametry a jejich výpočty, mimo jiné i pro sestavení výše uvedených deformačních křivek, jsou k nahlédnutí v příloze B.

U polymerů je statické zkoušky důležité dělit na krátkodobé a dlouhodobé z důvodu zpožděné elastické deformace, tzv. viskoelastické deformace. Ta spočívá v tom, že houževnatý polymerní materiál se bude při rychlém zatěžování chovat jako tuhý a pevný materiál, ale při pomalém zatěžování bude materiál mnohem více plastický a dojde tak k větším deformacím (viz. obr. 24). Deformace polymerů je tedy časově závislá a zvolená rychlost zatěžování při tahové zkoušce ovlivňuje naměřené hodnoty. Výsledky dlouhodobé statické zkoušky jsou

přesnější a získané hodnoty je vhodné používat pro konstrukční výpočty. Krátkodobé statické zkoušky mají více informativní charakter a jejich použití je výhodné při porovnávání mechanických vlastností různých materiálů [58].



Obrázek 24 Rozdíl deformací stejných vzorků zatěžovaných různou rychlostí [58]

#### 4.2.1 Modelování a tisk zkušebních vzorků

Pro tisk několika sad zkušebních vzorků byly k dispozici 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S (viz. obr. 25) a German RepRap X400 PRO v3 (viz. obr. 26).

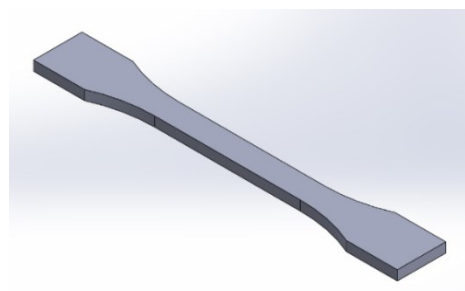


Obrázek 25 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [59]



Obrázek 26 3D tiskárna German RepRap X400 PRO v3 [60]

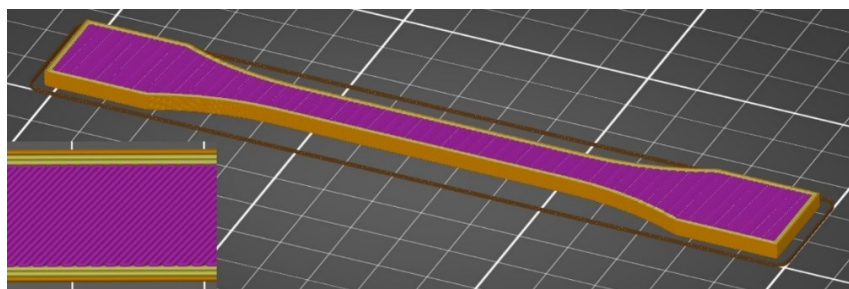
Dle normy ISO 527-2 byl zvolen typ vzorku 1B, jehož tvar a rozměry jsou uvedeny v příloze C. 3D model vzorku zvoleného typu byl vytvořen v CAD softwaru SolidWorks (viz. obr. 27). Pro účely dalšího zpracování ve sliceru byl 3D model vyexportován do formátu STL.



Obrázek 27 3D model zkušebního vzorku v SolidWorks

Pro zpracování 3D modelu zkušebního vzorku na G-code pro tisk na 3D tiskárně German RepRap X400 PRO v3 byl využit program Simplify3D. Vzhledem k povaze vzorků

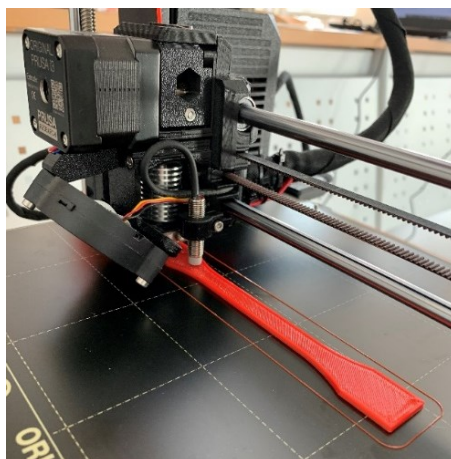
byl zvolen tisk relativně vysokými vrstvami o výšce 0,37 mm, protože nebyl požadavek na detailní tisk, nýbrž spíše na rychlejší tisk. Teplota extrudéru byla pro tištěné PLA materiály nastavena na 215 °C a podložka byla během tisku nahřata na 60 °C. Tisk probíhal na podložku s nalepenou papírovou páskou pokrytou tenkou vrstvou univerzálního lepidla Herkules pro zajištění dostatečné adheze výtisků. Pro provedení tahových zkoušek materiálu jako takového je třeba plná výplň, a proto byla nastavena na 100 %. Konkrétně se jednalo a přímočarou výplň pod úhlem 45° (viz. obr. 28). Z hlediska principu FDM 3D tisku nicméně i přes toto nastavení není možné dosáhnout dokonale plného materiálu jako u výroby z polymerů např. vstřikováním do forem. Znamená to, že zjištěná pevnost materiálu může být tímto faktorem negativně ovlivněna.



*Obrázek 28 Naslicovaný zkušební vzorek v PrusaSlicer s detailním pohledem na 100% výplň*

Při použití již vytvořeného kódu i pro tisk na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S docházelo k problémům s udržení výtisku přilnutého k podložce po celou dobu tisku, protože tento kód obsahoval informaci o tisku na podložku o teplotě pouze 30 °C. Při tisku na předchozí tiskárně byla teplota upravena na 60 °C ručně během tisku. Ve skutečnosti se teplota ale nastavovala vyšší, protože byla z měření termokamerou známá skutečnost, že skutečná teplota podložky je o 8 °C nižší než nastavená. Pro tisk na tiskárně Original Prusa i3 MK3S byl vytvořen kód jiný, a to softwarem PrusaSlicer přímo od výrobce tiskárny s použitím již přednastaveného profilu pro tisk z PLA materiálu méně detailním tiskem. Jevilo se to jako nejefektivnější řešení, protože to zajistilo spolehlivý průběh tisku při nejkratším času nastavování. Upravila se pouze výplň na hodnotu 100 % (viz. obr. 28). S tímto nově vytvořeným kódem již nebyly problémy s odlepováním výtisku od podložky, protože byla nahřata na požadovaných 60 °C. Tisk zde probíhal přímo na PEI podložku bez použití pomocných principů pro zlepšení adheze, jelikož sama o sobě poskytuje dobré adhezní vlastnosti. Průběh tisku na této tiskárně je na obr. 29.





Obrázek 29 Tisk zkušebního vzorku na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S



Obrázek 30 Vyřazený prohnutý vzorek

Na obr. 30 je ukázka vzorku u kterého nastalo kroucení projevující se odlepováním jeho krajních částí od podložky během tisku. Vlivem vysokých teplot tisku a přílišným chladnutím spodních vrstev došlo k velkému teplotnímu rozdílu, což vedlo ke kroucení. Právě zvýšení teploty podložky z 30 °C na 60 °C snížilo teplotní rozdíl, kroucení nebylo tak výrazné, a adheze byla dostatečná pro udržení vzorku na místě bez odlepení. Dalším problémem, který může nastat při odlepování výtisků od podložky je, že zkroucená odlepená část může zasahovat do nebo nad aktuálně tištěné vrstvy, čímž může dojít ke kolizi výtisku a trysky extruderu.

Ve výsledku bylo vytištěno celkem 6 sad vzorků z filamentů a na 3D tiskárnách dle následující tab. 1.

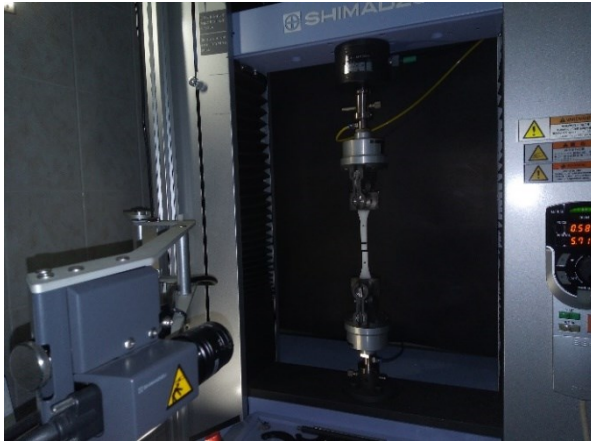
Tabulka 1 Sady vzorků pro tahové zkoušky

Číslo sady	Počet vzorků	Filament	3D tiskárna	Poznámka
1	5	German RepRap 100505 PLA	German RepRap X400 PRO v3	
2	5	RS PRO Black PLA	German RepRap X400 PRO v3	
3	4	German RepRap 100505 PLA	German RepRap X400 PRO v3	
4	5	German RepRap 100505 PLA	German RepRap X400 PRO v3	
5	5	Gembird 3DP-PLA1.75-01-R	Original Prusa i3 MK3S	Tloušťka vzorků 2 mm
6	2	Gembird 3DP-PLA1.75-01-R	Original Prusa i3 MK3S	

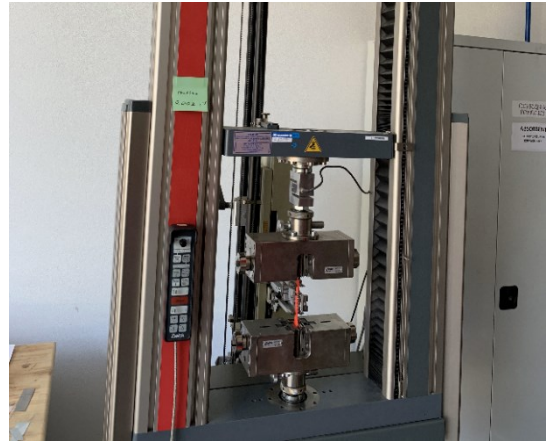
#### 4.2.2 Provedení mechanických zkoušek pevnosti v tahu

Mechanické zkoušky pevnosti v tahu dle normy ISO 527-1 na jednotlivých sadách vytištěných zkušebních vzorků byly provedeny na dvou různých univerzálních zkušebních strojích, a to sady 1 až 3 na japonském Shimadzu Autograph AG-Xplus (viz. obr. 31)

s maximální zatěžovací silou 20 kN a sady 4 až 6 na německém Zwick Z030 (viz. obr. 32) s maximální zatěžovací silou 30 kN.



Obrázek 31 Shimadzu Autograph AG-Xplus



Obrázek 32 Zwick Z030

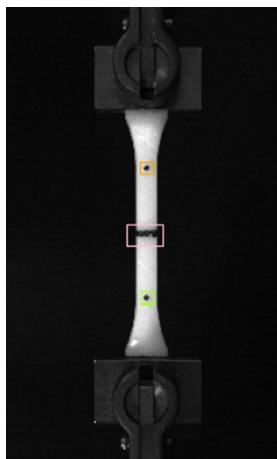
Před provedením tahové zkoušky každého vzorku byly pečlivě posuvným měřidlem zjištěny skutečné hodnoty šířky a tloušťky jeho pracovní oblasti, které byly následně zadány do příslušného softwaru daného univerzálního zkušebního stroje. Ačkoliv jsou rozměry dány normou, je tímto způsobem nutno odstranit, nebo alespoň výrazně snížit, vliv nepřesností výroby vzorků na výsledcích tahových zkoušek. Skutečné naměřené hodnoty těchto rozměrů u každého vzorku jsou uvedeny v příloze D. Dále byl vzorek upnut do čelistí univerzálního zkušebního stroje vzdálených od sebe 115 mm. Důležitým parametrem zkoušky byla rychlost zatěžování. Vzhledem k provádění krátkodobé tahové zkoušky bylo požadavkem, aby k přetržení vzorku docházelo přibližně do 20 sekund od počátku zkoušky. Pro první testovaný vzorek byla odhadem zvolena rychlost zatěžování 20 mm/min, což je jedna z normou doporučených rychlostí. Na základě dosažených výsledků, především času lomu vzorku, bylo usouzeno, že je tato rychlost vhodná a byla tedy ponechána i pro všechna následující měření. Průběh jedné ze zkoušek složením několika snímků je v příloze E.

Na obou použitých univerzálních zkušebních strojích bylo během tahové zkoušky zaznamenáváno také prodloužení a příčné zúžení vzorků v jejich pracovní oblasti konstantního průřezu o délce 60 mm. Nutno ovšem podotknout, že norma udává měření pouze 50 mm dlouhé střední části zkušebního vzorku. Z hlediska použité metody se měření těchto hodnot na jednotlivých univerzálních zkušebních strojích lišilo.

Při tahových zkouškách na univerzálním zkušebním stroji Shimadzu bylo využito bezdotykového digitálního video průtahoměru TRViewX od téhož výrobce. Při této metodě byly vzorky označeny kontrastními body v krajních pozicích pracovní oblasti. Průběhy

tahových zkoušek byly nahrávány videokamerou a software analyzoval vzdalování daných bodů ze záznamu. Tak se získávaly hodnoty prodloužení pracovní části vzorku. Pro získávání hodnot zúžení se ze záznamu analyzovala aktuální šířka kontrastní příčné čáry ve středu pracovní oblasti přes celou šířku vzorku. Pohled na upnutý vzorek přes videokameru s již softwarem vyznačenými snímanými body a čarou je vidět na obr. 33.

Získávání stejných hodnot na zkušebních vzorcích při použití univerzálního zkušebního stroje Zwick bylo průtahoměrem založeném na mechanickém principu. Pro měření prodloužení pracovní oblasti vzorku byla na jeho krajní polohy umístěna ramena průtahoměru, vzorek jimi byl sevřen a při protahování vzorku během zkoušky zaznamenával prodloužení právě pouze pracovní oblasti, resp. vzdalování ramen. Pro zabezpečení stálé polohy ramen na vzorku jsou konce těchto ramen opatřeny břity. Součástí toho je i snímač příčného zúžení, který je též mechanický, kdy jeho ramena obejmou a svírají šířku vzorku v pracovní oblasti s jejímž zužováním během tahové zkoušky se ramena přibližují. Celý tento systém je uveden na obr. 34.



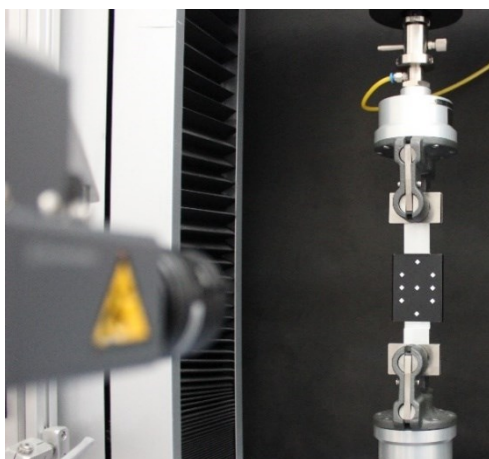
Obrázek 33 Měření video průtahoměrem TRViewX (Shimadzu)



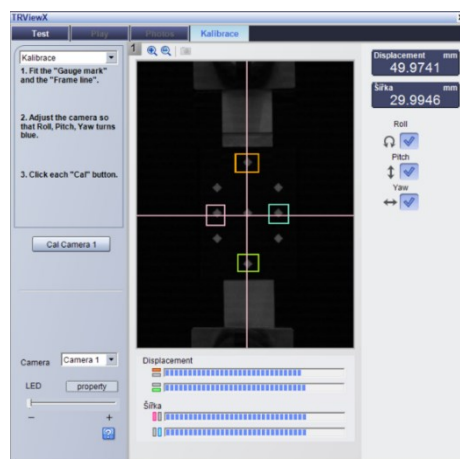
Obrázek 34 Měření mechanickým průtahoměrem (Zwick)

V obou případech byl měřicí software připraven pro integraci průtahoměrů, a proto nebylo nutné používat žádný dodatečný software. Nevýhodou při měření na Zwick Z030 s mechanickým průtahoměrem byla nemožnost získání dat o prodlužování pracovní oblasti z průtahoměru a současně získat i hodnoty vzdalování čelistí. U tohoto zařízení je možné zaznamenávat pouze jednu z těchto hodnot. V případě měření na Shimadzu Autograph AG-Xplus s video průtahoměrem bylo možné získat obě hodnoty. V jeho neprospěch ovšem hovoří časově náročnější příprava měření, vzhledem k nutnosti kalibrace video průtahoměru před začátkem měření.

Kalibrace video průtahoměru TRViewX se provádí následovně. Do čelistí univerzálního zkušebního stroje se upne kalibrační destička a kamera video průtahoměru se umístí do pracovní polohy (viz. obr. 35). Kalibrační destička má na sobě body v podobě kosočtverců, kde vzdálenosti jejich středů od sebe jsou známé. V měřícím softwaru v kalibraci video průtahoměru se v tu chvíli zobrazují aktuální změřené vzdálenosti těchto bodů a porovnávají se se skutečnými vzdálenostmi na kalibrační destičce. Konkrétně se jedná o dva nejvzdálenější body ve vodorovném směru a dva nejvzdálenější body ve svislém směru (viz. obr. 36). Kalibrace spočívá v jemném doladění polohy kamery v prostoru tak, aby se hodnoty vzdáleností měřené a skutečné téměř nelišily. Drobné nepřesnosti jsou ze známého rozdílu vzdáleností skutečných a naměřených následně během zkoušek softwarově korigovány.



Obrázek 35 Kalibrace video průtahoměru TRViewX



Obrázek 36 Snímané body kalibrační destičky

Z hlediska rozsahu naměřených dat z tahových zkoušek lze říci, že univerzální zkušební zařízení Shimadzu Autograph AG-Xplus odečítá aktuální hodnoty častěji než Zwick Z030. Na Shimadzu bylo zaznamenáváno přibližně dvakrát více řádků oproti Zwick při podobné délce zkoušky. Také si lze povšimnout menších rozdílů vždy mezi dvěma po sobě jdoucími hodnotami na Shimadzu, a to především v počátku tahové zkoušky, kdy se v čase mění síla nejrychleji. Fotografie části vzorků po provedených tahových zkouškách je v příloze F.

#### 4.2.3 Výsledky provedených tahových zkoušek

Naměřená data byla pro účely prezentování a porovnávání převedena do grafické podoby a byly vyhodnoceny základní charakteristické veličiny materiálů. Všechny hodnoty v následujících tabulkách jsou zaokrouhleny na 3 desetinná místa. Hodnoty tažnosti jsou pro účely porovnávání všechny uvedeny jako hodnoty relativního prodloužení pracovní oblasti vzorků při přetržení. Důvodem tohoto rozhodnutí bylo, že pro vzorky sad 3 až 6 nejsou k dispozici data o vzdalování čelistí.



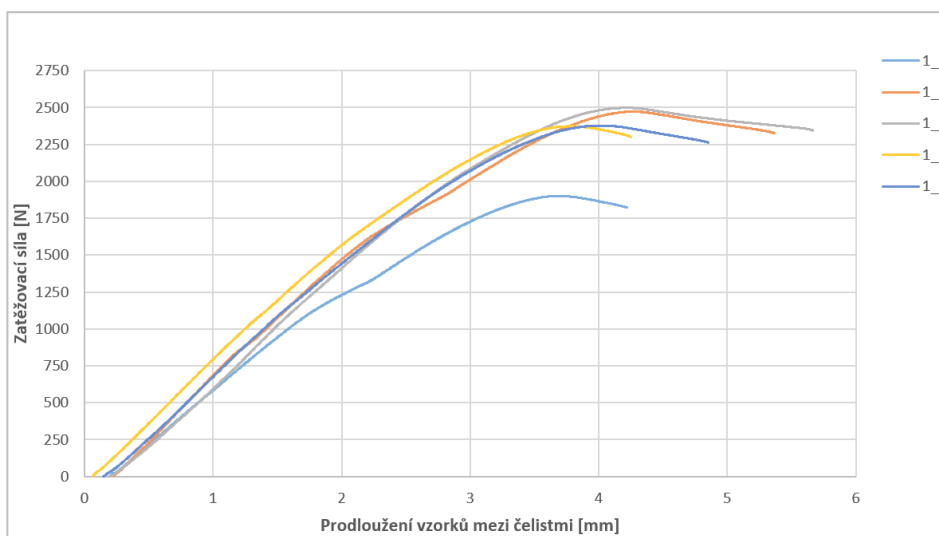
Obrázek 37 Lom zkušebních vzorků po tahové zkoušce

U všech zkoušených vzorků došlo ke křehkému lomu bez výrazné tvorby krčku (viz. obr. 37). Dále na stejném obrázku je, především u červeného vzorku, vidět na jeho povrchu struktura materiálu ve které jsou zřetelné jednotlivé tiskárnou pokládané části materiálu mezi kterými si v některých místech lze povšimnout nevyplněných míst. Je to také vidět při přímém pohledu na lom i uvnitř vzorku. To je důkaz o dříve zmiňované nemožnosti dosažení dokonalé 100 % výplně FDM 3D tiskem, což je faktor ovlivňující výsledky prováděných experimentů.

### Sada 1 (German RepRap 100505 PLA)

Tabulka 2 Význačné hodnoty měření sady 1

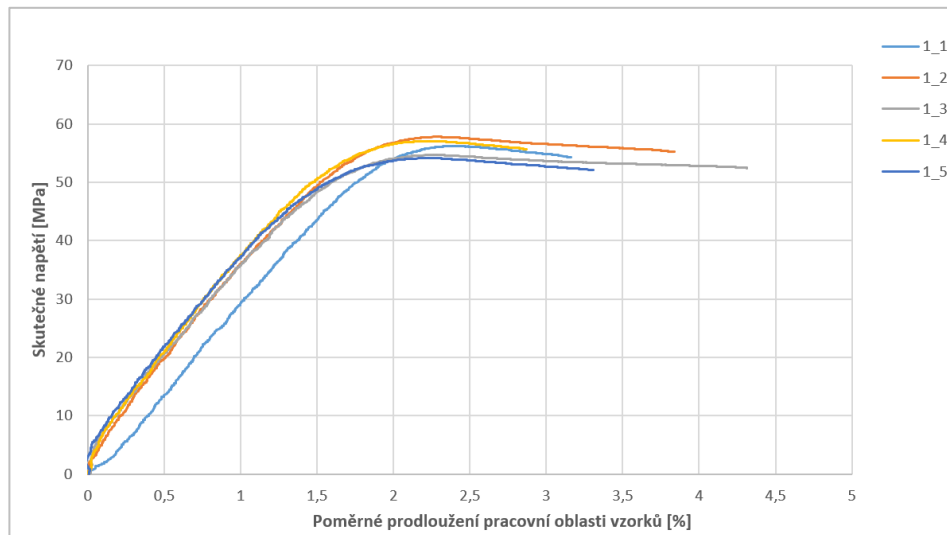
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Maximální zatěžovací síla [N]	2324,660	243,332
Napětí na mezi pevnosti [MPa]	54,701	1,503
Skutečné napětí na mezi pevnosti [MPa]	55,950	1,546
Tažnost [%]	3,499	0,575



Graf 2 Závislost zatěžovací síly na prodloužení vzorků mezi čelistmi sady 1

V tab. 2 jsou uvedeny nejdůležitější hodnoty z měření sady 1. Za povšimnutí stojí směrodatná odchylka průměrné hodnoty maximální zatěžovací síly, která je velice vysoká. Je to dáno vzorkem 1\_1, u kterého byla zatěžovací síla v celém průběhu zkoušky výrazně nižší než u ostatních vzorků stejné sady (viz. graf 2). Důvod této odchylky lze zjistit při pohledu do

tabulky rozměrů vzorků zjištěných posuvným měřidlem před začátkem tahové zkoušky (viz. příloha D), ze které vyplývá, že průřez tohoto vzorku v pracovní oblasti je výrazně menší oproti ostatním stejné sady. Byl to důvod ke zvážení jeho odstranění z dalšího zpracování, nicméně poměrné hodnoty nejsou tímto faktorem ovlivněny, a proto bylo rozhodnuto o jeho zachování. Při zanedbání vzorku 1\_1 by průměr z hodnot maximálních zatěžovacích sil byl  $2308,933 \pm 35,388$  N. Tím se směrodatná odchylka výrazně snížila a je tedy vidět velký vliv průřezu pracovní oblasti vzorků na tuto hodnotu.



Graf 3 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 1

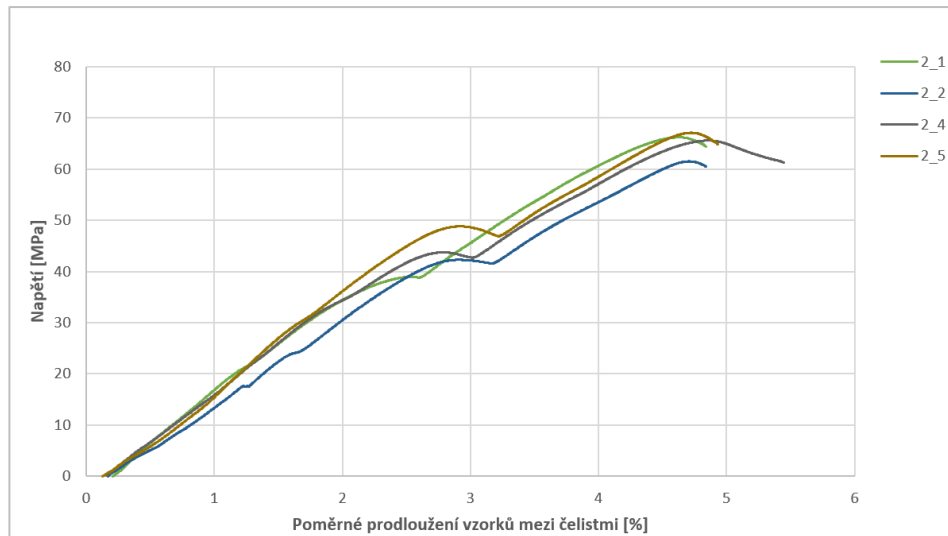
V grafu 3, kde se uvádí závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků, je vidět, že vzorek 1\_1 s menším průřezem se v hodnotách napětí nijak zásadně neodlišuje od ostatních vzorků téže sady.

## Sada 2 (RS PRO Black PLA)

Při měření vzorku 2\_3 této sady došlo při tahové zkoušce k prokluzu vzorku v čelistech univerzálního zkušebního stroje, čímž došlo ke zkreslení hodnot, a proto byl tento vzorek z dalšího zpracování vyjmut. Následující tab. 3 již tedy obsahuje důležité hodnoty této sady bez zmíněného vzorku. Tato sada dosahovala nejvyšších hodnot meze pevnosti ze všech testovaných sad.

Tabulka 3 Význačné hodnoty měření sady 2

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Maximální zatěžovací síla [N]	2812,290	22,139
Napětí na mezi pevnosti [MPa]	65,081	2,471
Skutečné napětí na mezi pevnosti [MPa]	66,472	2,520
Tažnost [%]	2,398	0,166



Graf 4 Závislost napětí na poměrném prodloužení vzorků mezi čelistmi sady 2

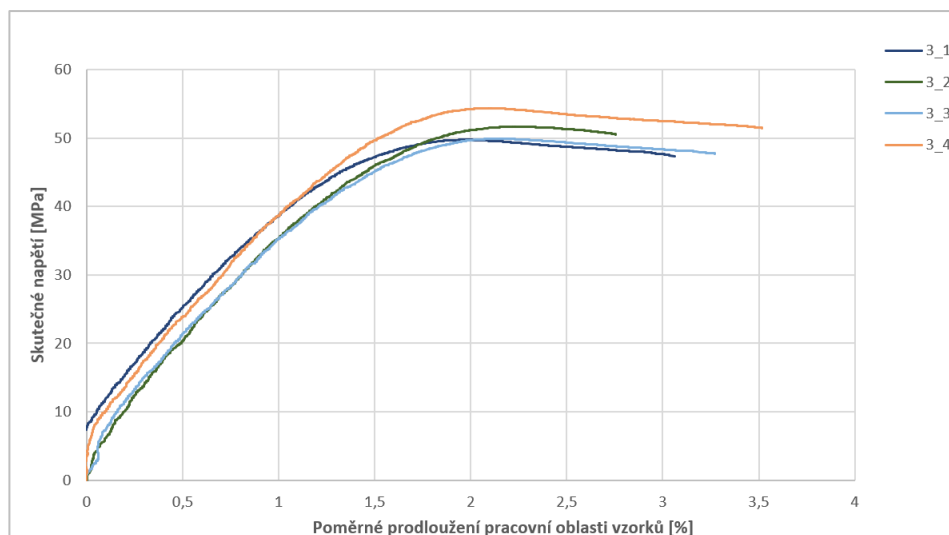
Zajímavým objektem sledování u sady 2 byla viditelná mez kluzu (viz. graf 4). Dříve v práci bylo zmíněno, že byla snaha o 100% výplň vzorků, kterou ale obvykle technologie FDM 3D tisku nedosahuje i přes její nastavení při tisku. Viditelná mez kluzu u těchto vzorků nicméně naznačuje, že právě možná bylo docíleno 100% výplně téměř dokonale, jako např. v případě vstřikování polymerů do forem. Podobných výsledků u jiných sad dosaženo nebylo.

### Sada 3 (German RepRap 100505 PLA)

Tato sada byla vytištěna ze stejného materiálu jako sada 1. Důležité hodnoty jsou uvedeny v tab. 4 a jsou si se sadou 1 očekávaně velice podobné. Největším rozdílem ovšem jsou přibližně o 4 MPa až 5 MPa nižší dosahovaná napětí smluvní i skutečná. I přes tento faktor je průběh skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků (viz. graf 5) velmi podobný stejným závislostem vzorků ze stejného materiálu sady 1 (viz. graf 3).

Tabulka 4 Význačné hodnoty měření sady 3

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Maximální zatěžovací síla [N]	2259,600	29,393
Napětí na mezi pevnosti [MPa]	50,380	2,093
Skutečné napětí na mezi pevnosti [MPa]	51,448	2,148
Tažnost [%]	3,151	0,324

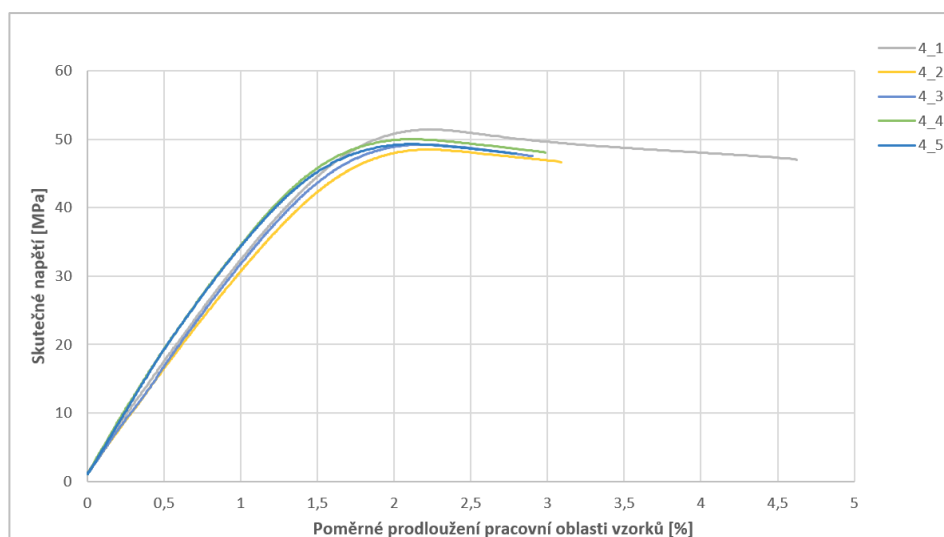


Graf 5 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 3

### Sada 4 (German RepRap 100505 PLA)

Tabulka 5 Význačné hodnoty měření sady 4

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Maximální zatěžovací síla [N]	2260,074	62,400
Napětí na mezi pevnosti [MPa]	49,322	1,090
Skutečné napětí na mezi pevnosti [MPa]	49,700	1,107
Tažnost [%]	3,279	0,762



Graf 6 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 4

Sada 4 je ze stejného filamentu jako předchozí sady 1 a 3, oproti kterým ale byla testována na jiném univerzálním zkušebním zařízení. Hodnotami se tato sada velmi podobá sadě 3. Tím pádem sadu 1 lze považovat za odlišnou, kde mohlo dojít např. k lepšímu vyplnění vzorků materiálem při jejich tisku, což mohlo kladně ovlivnit jejich pevnost. Dále vzhledem k tomu že sady 3 a 4 s téměř stejnými hodnotami byly zkoušeny na dvou různých univerzálních



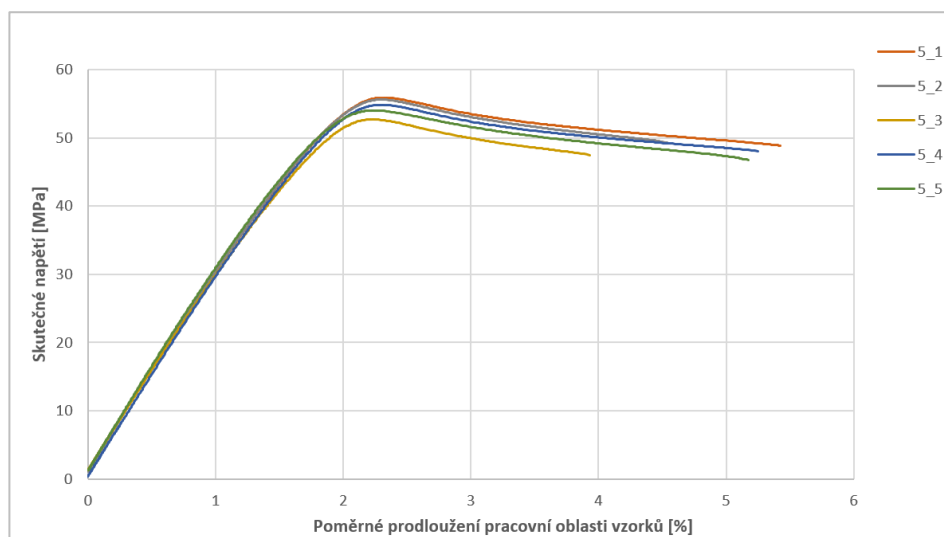
zkušebních zařízeních, tak lze vyloučit rozdílnost v jejich měření. Průběhy skutečného napětí v grafu 6 jsou u všech vzorků téměř totožné vyjma vzorku 4\_1, který dosáhl znatelně vyšší tažnosti oproti ostatním vzorkům.

### Sada 5 (Gembird 3DP-PLA1.75-01-R)

Tato sada byla jediná vytištěná s tloušťkou pouze 2 mm především z důvodu úspory času při tisku, nicméně to navíc umožňovalo porovnat vzorky se stejného materiálu s větší a menší tloušťkou. V tab. 6 důležitých hodnot je tedy vidět, že průměrná maximální zatěžovací síla je nejmenší ze všech měřených sad, a to přibližně poloviční oproti ostatním čistým PLA, což odpovídá vzhledem k přibližně polovičnímu průřezu pracovní oblasti.

Tabulka 6 Význačné hodnoty měření sady 5

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Maximální zatěžovací síla [N]	1058,888	35,971
Napětí na mezi pevnosti [MPa]	54,244	1,271
Skutečné napětí na mezi pevnosti [MPa]	54,653	1,293
Tažnost [%]	4,863	0,619



Graf 7 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 5

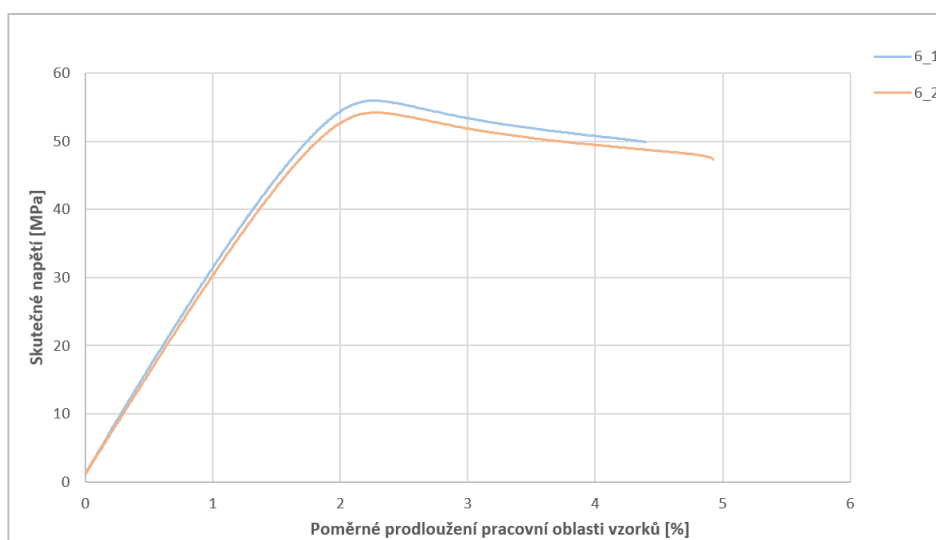
V grafu 7 jsou křivky závislosti skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní části vzorků této sady.

### Sada 6 (Gembird 3DP-PLA1.75-01-R)

Tabulka 7 Význačné hodnoty měření sady 6

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Maximální zatěžovací síla [N]	2213,840	38,848
Napětí na mezi pevnosti [MPa]	54,665	1,268
Skutečné napětí na mezi pevnosti [MPa]	55,111	1,239
Tažnost [%]	4,660	0,378

Tato sada obsahovala pouze 2 vzorky, což je za normálních okolností málo pro zpracovávání statistických dat. Nicméně v tomto případě to bylo i tak provedeno (viz. tab. 7), protože předchozí sada 5 obsahovala vzorky ze stejného filamentu vytištěné na stejné tiskárně, a proto bude porovnání směřovat hlavně tímto směrem. Ze srovnání hodnot v tab. 7 a tab. 8 lze vidět opravdu pouze zásadní rozdíl v zatěžovací síle. Ostatní hodnoty jsou téměř totožné a menší tloušťka vzorků sady 5 tedy neměla vliv na naměřené hodnoty napětí a tažnosti. Stejně tak průběhy závislosti skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti si obě sady odpovídají (porovnání grafu 7 a 8).



Graf 8 Závislost skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti vzorků sady 6

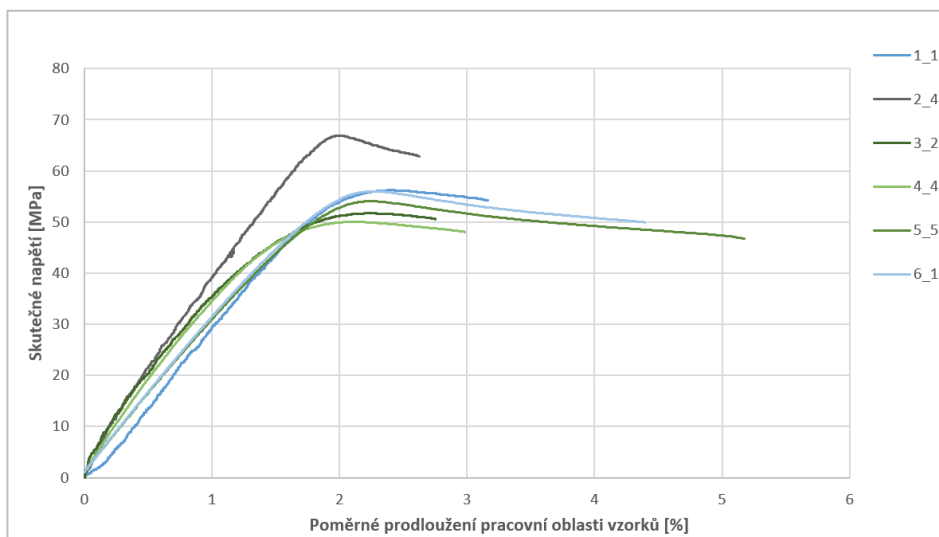
#### 4.2.4 Diskuze výsledků

Testované filamenty od výrobců Gembird a German RepRap byly standartní čisté PLA filamenty, které by se od sebe vlastnostmi neměly zásadně lišit. Zjištěné výsledky u těchto filamentů toto potvrzují, nicméně mírně rozdílné zjištěny byly. Skutečná napětí na mezi pevnosti se u jednotlivých sad těchto dvou filamentů mezi sebou liší v rozsahu do 10 %. Největší rozdíly byly zjištěny z hlediska tažnosti, kde PLA filament Gembird dosahoval o 40 % až 45 % vyšších hodnot, tzn. že k přetržení vzorku docházelo při o téměř polovinu větším prodloužení ve srovnání s PLA filamentem German RepRap.

Odlišujícím se PLA filamentem od těchto dvou předchozích byl PLA filament RS PRO Black PLA, který dle dokumentace od výrobce [61] je oproti standartním PLA filamentům mírně modifikovaný a má tak dosahovat vyšší pevnosti a být méně křehký. Fakt o vyšší pevnosti se zkouškami potvrdil a oproti předchozím testovaným standartním PLA filamentům dosahoval až o 30 % vyššího skutečného napětí na mezi pevnosti. Tažnost byla u tohoto filamentu zároveň

ze všech testovaných nejmenší. Při srovnání s PLA filamentem German RepRap docházelo k přetržení vzorku při přibližně o 38 % menším prodloužení a ve srovnání s PLA filamentem Gembird to bylo o téměř 100 %.

Výše uváděné rozdílné skutečnosti hodnot skutečného napětí lze pozorovat v grafu 9, kde jsou srovnání typičtí zástupci vzorků jednotlivých sad.



Graf 9 Srovnání závislosti skutečného napětí na poměrném prodloužení pracovní oblasti typických vzorků ze všech sad

Nabízelo se i srovnání naměřených výsledků s hodnotami udávanými od výrobců, ale žádný z výrobců testovaných filamentů neudává hodnoty, které by byly porovnatelné s v práci naměřenými. Každý výrobce udává jiné údaje s tím, že někteří pouze ty nejzákladnější a jiní udávají velice podrobné údaje. Výtažky z dokumentací o vlastnostech testovaných filamentů v rámci této práce jsou k nahlédnutí v příloze G. Za povšimnutí stojí, že jediný výrobce, který udává hodnotu napětí na mezi pevnosti v tahu je RS. Problémem ve srovnání s jejich udávanými hodnotami je v tom, že mechanické zkoušky prováděli dle americké normy ASTM D882, která se zabývá zkoušením vzorků s tloušťkou pouze do 1 mm (viz. [62]), a proto s v práci použitou normou ISO 527-1 není bohužel ani přibližně srovnatelná.

Veškeré ostatní v předchozích odstavcích pro porovnávání a okomentování nevyužité grafy závislostí veličin, které byly z dostupných dat z měření vytvořeny, jsou k dispozici k nahlédnutí v příloze H.

## 5 Návrh postupu tisku vybraného dílu s použitím SolidWorks

V této kapitole bude na konkrétním dílu ukázán proces vzniku 3D výtisku od prvotního nápadu. Konkrétním zvoleným dílem se stala část zádržného bezpečnostního systému automobilu, a to zámek bezpečnostního pásu. Ten slouží ke spolehlivému zapnutí bezpečnostního pásu. Celý tento systém má za úkol, především v případě nehody vozidla, udržet řidiče a případné spolucestující v sedačce vozidla. Nejen, že zabrání nebezpečnému vymrštění pasažérů v případě prudkého nárazu, ale udržení pozice v takové chvíli je podstatné i pro správnou funkci airbagů a navržených deformačních zón vozidla pro co nejvyšší zmírnění následků nehody co se týká zranění a životů posádky.



Obrázek 38 Zámek bezpečnostního pásu

Pro účel návrhu posloužil použitý funkční kus zámku bezpečnostního pásu (viz. obr. 38) a cílem bylo nahrazení jednotlivých polymerových částí daného kusu 3D tiskem vyrobenými částmi.

Nejedná se tedy o návrh úplně nového dílu. Tento případ může ukazovat použití v opravárenství, kdy se dají vytisknout díly, které se jako náhradní díly neprodávají. V případě nefunkčnosti zámku bezpečnostního pásu je obvykle nutný nákup celého nového kusu. Důvodem nefunkčnosti ovšem může být pouze rozbitá část, kterou může stačit vytisknout a nahradit. Tento proces opravy může být levnější, rychlejší a ekologičtější. Záleží ovšem na posouzení v každém konkrétním případě. Práce jde ale směrem ukázky 3D tisku prototypového dílu dle možného návrhu při vývoji.

Pro další postup bylo nutné zámek bezpečnostního pásu rozebrat. Vzhledem k tomu, že nebyl navržen jako rozebíratelný, bylo proto nutné rozříznutí vnějšího krytu. Stav po rozříznutí a otevření je vidět na obr. 39. Dále bylo nutné další rozebírání. Kompletně rozebraný zámek bezpečnostního pásu na jednotlivé díly je vidět na obr. 40. Skládá se celkem z 6 částí. V horní polovině obrázku zleva se nachází kryt rozříznutý na dvě části, tlačítko pro rozepnutí pásu a

vnitřní část. V dolní polovině obrázku jsou zleva dvě kovové součásti a vpravo se nachází samotný mechanismus upínaný k sedačce na který byly všechny ostatní části seskládány.



Obrázek 39 Rozříznutý zámek bezpečnostního pásu

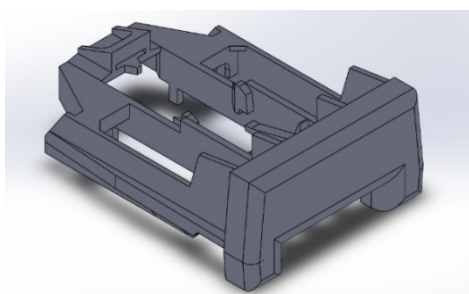


Obrázek 40 Rozebraný zámek bezpečnostního pásu

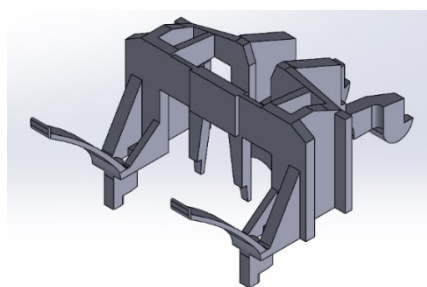
V tuto chvíli je tedy jasné, co je třeba vytisknout na 3D tiskárně - vnější kryt, tlačítko a vnitřní díl.

## 5.1 Tvorba 3D geometrických modelů

Dané části zámku bezpečnostního pásu byly převedeny na 3D modely pomocí CAD programu SolidWorks 2019. Při modelování byl kladen důraz na dodržení především funkčních rozměrů, tzn. aby každý prvek plnící nějakou funkci byl vůči ostatním v přesně dané pozici. Toho bylo s dostatečnou přesností docíleno měřením rozměrů posuvným měřidlem. Nejdříve byly postupně vymodelovány tlačítko (viz. obr. 41) a vnitřní díl (viz. obr. 42) dle původních vzorů.

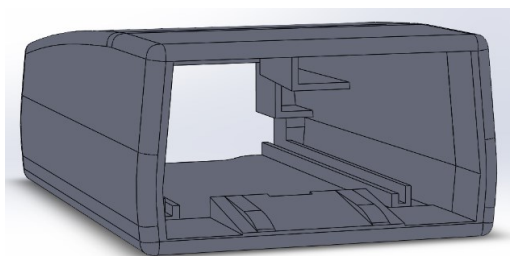


Obrázek 41 3D model tlačítka

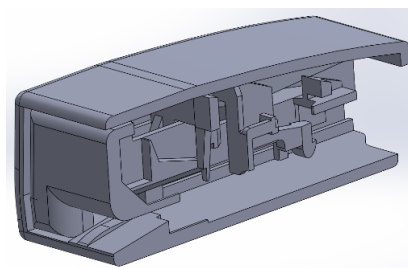


Obrázek 42 3D model vnitřního dílu

Při modelování vnějšího krytu se opět vycházelo z rozměrů a tvaru původního dílu, nicméně bylo využito modelování v sestavě na již vytvořených dílech tak, aby jednotlivé části správně dosedaly. 3D model krytu je na obr. 43. S vloženými modely v sestavě (viz. obr. 44) bylo zkontrolováno, zda mezi jednotlivými díly nedochází ke kolizím. Bylo zjištěno, že z tohoto hlediska je vše v pořádku.

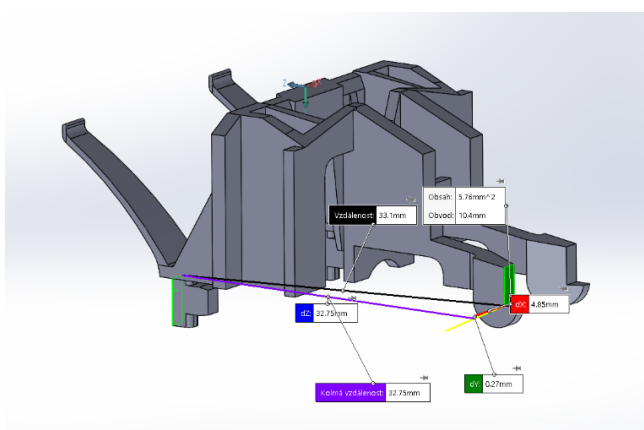


Obrázek 43 3D model vnějšího krytu



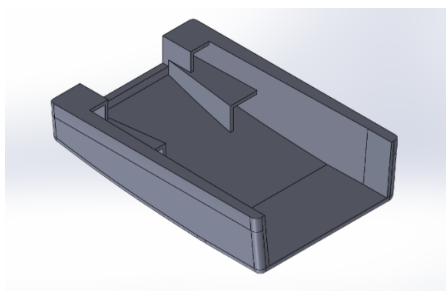
Obrázek 44 Sestava dílů v řezu – kontrola kolizí dílů

Důležité funkční rozměry vzorů byly nakonec ještě jednou přeměřeny a porovnány s rozměry na vytvořených geometrických modelech (viz. obr. 45). Zjištěny byly pouze drobné nepřesnosti bez vlivu na funkci.

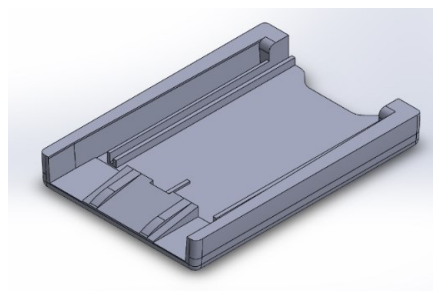


Obrázek 45 Kontrola rozměrů

V dalším kroku byl vnější kryt rozdělen na dvě části vodorovnou rovinou ve správné výšce tak, aby byl výtisk složitelný. Bylo to provedeno již teď i přes to, že v dalším zpracování modelů před tiskem ve sliceru je též podobný úkon možné udělat. Horní a spodní část rozděleného vnějšího dílu, uložené jako dva samostatné díly, jsou vidět na následujících obrázcích 46 a 47.



Obrázek 46 3D model horní části krytu



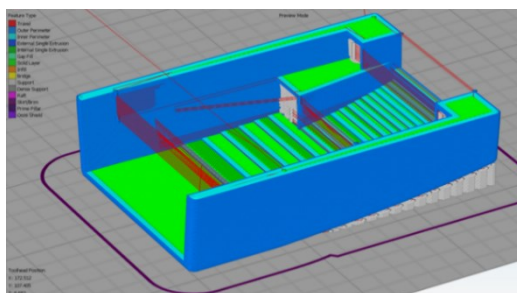
Obrázek 47 3D model spodní části krytu

Hotové modely byly uloženy ve formátu STL pro zpracování ve sliceru v dalším kroku, kde již bude probíhat příprava k samotnému 3D tisku.

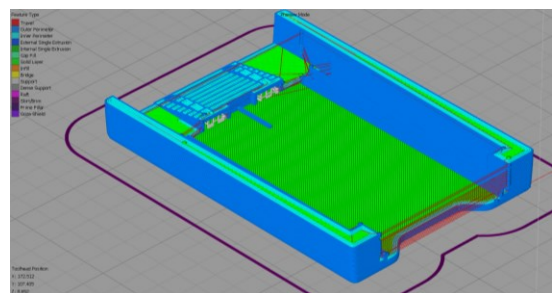
## 5.2 Příprava modelů k 3D tisku a jeho provedení

Tisk dílů byl proveden na tiskárně German RepRap X400 PRO v3. G-code byl pro všechny díly tvořen pomocí slicovacího programu Simplify 3D. Z hlediska nastavení tisku bylo použito přednastaveného profilu pro tisk z PLA filamentu s provedením drobných úprav. Tisk probíhal tryskou o průměru 0,4 mm s téže šířkou vrstvy. Výška vrstvy byla 0,28 mm, což je méně než v případě tisku zkušebních vzorků. Je to z důvodu, že v tomto případě probíhal tisk relativně složitých dílů a bylo potřeba dosáhnout více detailního tisku. Některé stěny dílů byly velice tenké, a proto byl pro všechny díly mimo jiné i pro zvýšení pevnosti, zvolen tisk 100 % výplní. Ukázka krátké části jednoho z vytvořených G-code je v příloze I.

Pro komunikaci s tiskárnou se následně používal software Repetier-Host a Repetier-Server, do kterých se vkládaly G-codes ze Simplify 3D. To z hlediska tisku přináší některé výhody, kterými jsou především správa tisku na dálku a sledování průběhu tisku webkamerou.

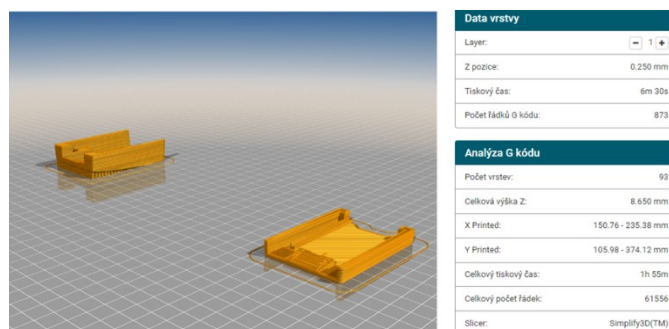


Obrázek 48 Naslicovaná horní část krytu (Simplify 3D)



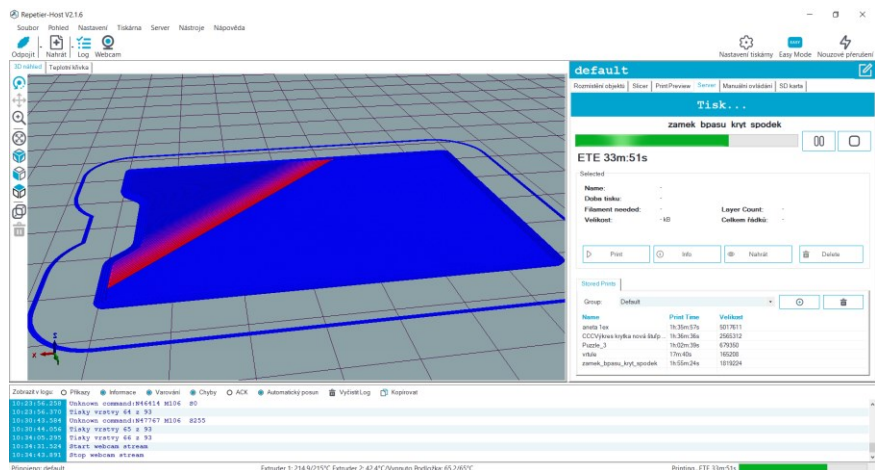
Obrázek 49 Naslicovaná spodní část krytu (Simplify 3D)

Na obrázcích 48 a 49 jsou naslicované obě části vnějšího krytu. Umístění na podložku bylo voleno vhodně tak, aby bylo nutné tisknout co nejméně podpěr, které jsou na obrázcích vyobrazeny šedivou barvou.



Obrázek 50 Vizualizace tisku obou částí krytu (Repetier-Server)

Na obr. 50 je 3D náhled tištěných částí krytu v softwaru Repetier-Server z G-code vytvořeném v Simplify 3D. Zobrazuje se též základní analýza G kódu, kde je možné vidět např. počet vrstev nebo celkový tiskový čas.

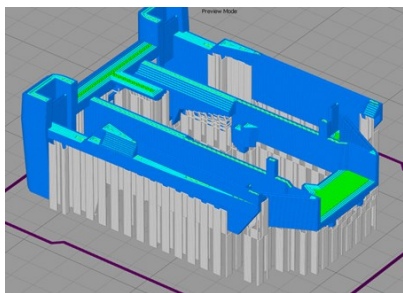


Obrázek 51 Průběh tisku krytu (Repetier-Host)

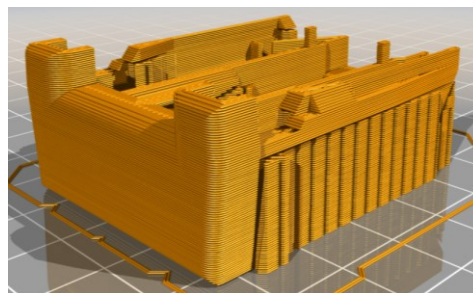


Obrázek 52 Snímek z webkamery z průběhu tisku krytu

Na obr. 51 je uveden náhled na průběh tisku krytu v softwaru Repetier-Host. Náhled je zobrazován v reálném čase. Modrou barvou jsou vyobrazeny již vytištěné ztuhlé části a červená barva označuje již položený filament, který má stále velice vysokou teplotu a není ztuhlý. V dolní části obrazovky jsou vypisovány aktuální příkazy 3D tiskárny a v pravé části je uveden zbývajícím čas tisku. Stejný časový okamžik z tohoto snímku obrazovky je zachycen i na obr. 52, kde je ovšem již reálný snímek z průběhu tisku webkamerou. Horní část krytu je v popředí snímku již vytištěna a v zadní části se tiskne horní část tohoto krytu.



Obrázek 53 Naslicované tlačítko (Simplify 3D)

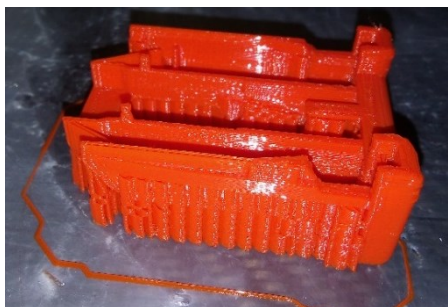


Obrázek 54 Vizualizace tisku tlačítka (Repetier-Host)

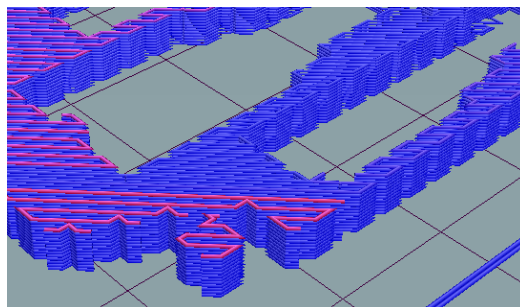
Na obr. 53 je vyobrazen naslicovaný další díl v Simplify 3D, kterým bylo tlačítko. Lze si povšimnout většího množství šedivě označených podpěr, a to proto, že díl nemá žádnou větší



souvislou rovnou plochu pro lepší umístění na podložku 3D tiskárny. Zobrazení vizualizace vytvořeného G-code již v softwaru Repetier-Host je na obr. 54.



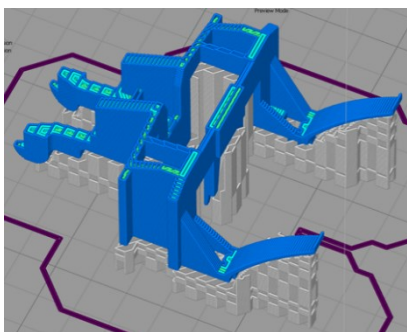
Obrázek 55 Tlačítko těsně po výtisku s podpěrami



Obrázek 56 Tvar podpěr (Repetier-Host)

Co se týká tisku podpěr, tak byl zvolen jejich tisk stejným materiálem jako samotný díl. Po výtisku je tedy výtisk spojený s vytištěnými podpěrami, které je nutno mechanicky odstranit (viz. obr. 55). Jejich tvar a umístění je koncipováno tak, aby vždy mezi materiálem dílu a podpěrami byla malá mezera pro možnost jejich odstranění. Dále podpěry nejsou plné, ale jsou zakroucené s volnými mezerami (viz. obr. 56). Tisk shora na podpěry je realizován tak, že se dělají přemostění přes volné prostory. Během této operace se využívalo větších otáček ventilátoru chlazení pro rychlejší ztuhnutí materiálu s co nejmenším propadnutím do volné mezery. Tohoto způsobu tisku na podpěry bylo využito u všech tištěných dílů.

Vzhledem k tomu, že použitá tiskárna disponovala dvěma extrudery, bylo možné zvolit tisk podpěr jiným, např. rozpustitelným, materiálem. Důvodem zvolení předchozí zmíněné metody bylo, že tisk dvěma extrudery vyžaduje velice precizní a zdlouhavé nastavování. Výhodou této metody by ovšem bylo dosažení lepšího povrchu dílu v místech podpěr a menší riziko poškození dílu při jejich odstraňování.



Obrázek 57 Naslicovaný vnitřní díl (Simplify 3D)



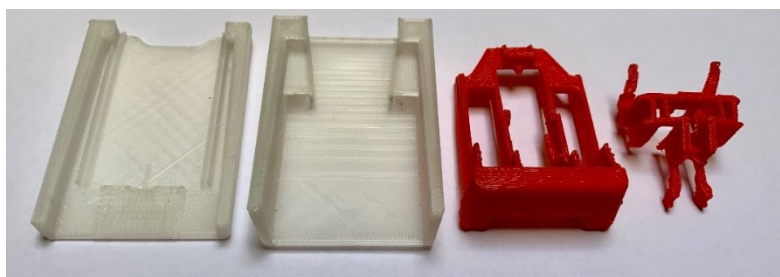
Obrázek 58 2D náhled tisku vnitřního dílu (Repetier-Server)

Posledním a zároveň nejnáročnějším k tisku byl vnitřní díl, jenž již naslicovaný je na obr. 57. Opět stejně jako u tlačítka je vidět tisk velkého množství podpěr. Zde je tisk navíc ztížen tím, že model je geometricky velice složitý. Jeho nejsložitější částí k tisku byly dvě pružinky

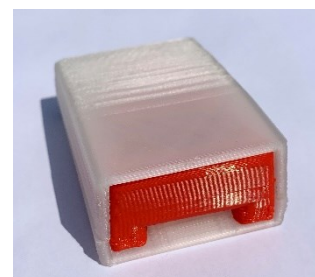
na obrázku v pravé části, jelikož se skládaly v podstatě pouze z jediné vrstvy materiálu. Proto v těchto, ale i některých dalších místech, byla záměrně snížena rychlost pohybu extruderu při tisku. Na obr. 58 je ukázán jeden z dalších možných, ještě nezmiňovaných náhledů. Je to 2D náhled shora, kde je opět v reálném čase vidět průběh tisku aktuální vrstvy včetně tras přejezdů extruderu. Jeho aktuální poloha je vyznačena velkým červeným bodem.

### 5.3 Zhodnocení prototypového dílu

3D tiskem vyhotovené díly zámku bezpečnostního pásu jsou na obr. 59, které z hlediska rozměrů od návrhu až po tisk jsou v pořádku a je možné je složit (viz. obr. 60).



Obrázek 59 Vytisknuté díly zámku bezpečnostního pásu



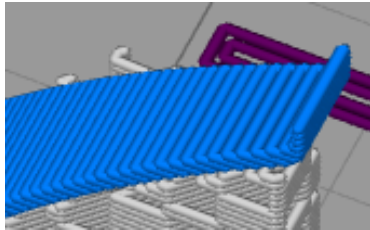
Obrázek 60 Složené vytisknuté díly

Na tisk prototypového zámku bezpečnostního pásu bylo spotřebováno celkem 46,5 g filamentu v celkové hodnotě 1,16 EUR. Dále je nutné uvažovat výdaje za provoz tiskárny. Tisk všech dílů trval dohromady téměř 3 a půl hodiny, čímž se cena zvýšila z 1,16 EUR za filament na celkových 16 EUR (přibližně 430 CZK). Detailnější rozpis na jednotlivé díly je uveden v tab. 8. Veškeré hodnoty jsou pouze orientační. Doba tisku byla vzhledem ke zpomalování pohybu extruderu v kritických místech reálně delší. Cena za hodinu práce 3D tiskárny byla stanovena daným pracovištěm, kdy ale každý provozovatel si může stanovit cenu vlastní. Spotřeba filamentu je vypočtena softwarem vždy na základě příslušného G-code a reálná spotřeba se opět může mírně lišit. Toto jsou faktory, které výslednou cenu ovlivňují a vyplývá z toho, že skutečná cena výtisků je pravděpodobně mírně vyšší než uvedená. I přesto je zřejmý fakt, že cena za filament je oproti nákladům na provoz 3D tiskárny minoritní. V tomto případě jsou náklady na filament pouze 7,25 % z nákladů celkových.

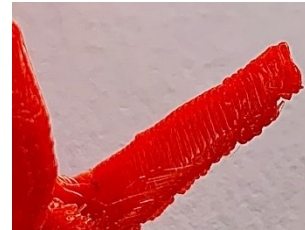
Tabulka 8 Údaje o 3D tisku dílů

Výtisk	Spotřeba filamentu	Cena filamentu	Doba tisku	Celková cena
Vnější kryt	30,3 g	0,76 EUR	1h:55m:24s	8,49 EUR
Tlačítko	12,1 g	0,30 EUR	1h:01m:03s	4,86 EUR
Vnitřní díl	4,1 g	0,10 EUR	0h:26m:29s	2,65 EUR
Celkem	46,5 g	1,16 EUR	3h:22m:56s	16 EUR

Z hlediska kvality jsou výtisky jakožto prototypové díly dostačující, nicméně při požadavku na vyšší kvalitu je možné takový výtisk provést např. použitím trysky o menším průměru nebo snížením výšky jednotlivých vrstev. U mohutnějších dílů to není tak zásadní, ale právě u drobnějšího vnitřního dílu, kde jsou tloušťky jednotlivých stěn velice malé se projeví nedokonalosti. Na obr. 61 je pohled na pružinku vnitřního dílu připravenou k tisku ve sliceru. Na dalším obr. 62 je již stejná část vyhotovena 3D tiskem a je možné si povšimnout nedokonalostí, které by se využitím zmíněných metod redukovaly.



Obrázek 61 Naslicovaná pružinka vnitřního dílu



Obrázek 62 Vytištěná pružinka vnitřního dílu

Dalším pozorovatelným jevem, který je ve větší či menší míře u FDM 3D tisku vždy, je zhoršená kvalita povrchu výtisku v místech podpěr (viz. obr. 63). Tisk na podložku je v porovnání v tisku na podpěry hladký, jak je vidět v horní části výtisku na obr. 64. V jeho spodní části je již vidět tisk na podpěry, jelikož zde byl model již pod úhlem vzhledem k podložce. Ovšem to, co způsobuje hrubší povrch není pouze tiskem na podpěry, ale v tomto případě i tiskem pod úhlem od podložky a jsou tedy vidět jednotlivé vrstvy ovlivněné jejich výškou.



Obrázek 63 Povrch výtisku po odstranění podpěr



Obrázek 64 Porovnání tisku na podložku a na podpěry

Dále volba různých barev několika složitelných dílů je výhodou, kdy především při jejich pohybu mezi sebou jsou jednotlivé díly jednoduše rozlišitelné. Vytištěný prototyp má z hlediska funkčnosti některé nedostatky, přesto je složitelný a může prezentovat funkci. Dobře tedy poslouží jako prezentace nápadu v podobě fyzického modelu pro manažery, zaměstnance z výroby a další lidi z firmy, kteří se k návrhu mohou vyjádřit a navrhnout případné úpravy, jejichž případná realizace v nový fyzický model je pomocí 3D tisku časově nenáročná.

## 6 Závěr a doporučení pro další výzkum

V rámci bakalářské práce bylo 3D tiskem vyhotoveno celkem 26 zkušebních vzorků pro mechanické zkoušky v tahu ze tří PLA filamentů od tří různých výrobců. K jejich vyhotovení bylo využito dvou různých FDM 3D tiskáren a následné experimenty probíhaly na dvou různých univerzálních zkušebních strojích s rozlišnými systémy měření prodloužení a zúžení vzorků v pracovní oblasti – video průtahoměr a mechanický průtahoměr. Měření aktuálního průřezu vzorku během zkoušky umožnilo pracovat jak s hodnotami smluvního napětí, tak s hodnotami skutečného napětí. Na základě zhodnocení experimentálních dat lze konstatovat následující závěry:

1. Zkušební vzorky z čistých PLA filamentů dvou rozdílných výrobců dosáhly mírně rozdílných mechanických vlastností v rozsahu cca. 10 %.
2. Vyšší výrobcem udávaná pevnost modifikovaného PLA filamentu oproti čistým PLA filamentům byla experimentem potvrzena.

V programu SolidWorks byla na základě skutečných dílů zámku bezpečnostního pásu automobilu vyhotovena jejich 3D geometrie. 3D tiskem byly zhotovené prototypové části zámku bezpečnostního pásu. Zamýšlený tisk dílů zámku v měřítku nebylo potřebné uskutečnit, nakolik u vytištěného dílu s poměrně složitou geometrií byly detailní části 3D tiskem poměrně dobře zachovány a lze díl pokládat za funkční.

V práci je uvedený postup od konstrukčního návrhu k realizaci prototypu zámku bezpečnostního pásu, který může posloužit jako demonstrační pomůcka pro lepší názornost funkčnosti jednotlivých dílů a pro možné geometrické úpravy jako např. pro optimalizaci tvaru těchto dílů.

### **Doporučení pro další výzkum:**

1. Pro geometricky velmi složité části je třeba optimalizovat podmínky 3D tisku, např. použitím trysky o menším průměru, aby i geometricky složitý díl zámku byl kvalitněji vytištěný. Doporučujeme použít trysku o průměru 0,25 mm a s tím souvisí úprava rychlosti tisku, výšky vrstvy, avšak na úkor času tisku.
2. Na některých dílech zámku se nacházejí části namáhané ohybem. Proto by bylo vhodné experimentálně realizovat zkoušky v ohybu, aby výsledky mechanických zkoušek byly komplexnější a bylo možné na základě nich navrhnout např. úpravu tvaru – geometrie.

## Použitá literatura

- [1] REDWOOD, Ben. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. In: *3D Hubs* [online]. 2020 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>
- [2] PRŮŠA, Josef a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. 1. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [3] GREGURIĆ, Leo. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [4] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. In: *Formlabs* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/#origins>
- [5] DECKARD, Carl, Joseph BEAMAN a James DARRAH. *Method for selective laser sintering with layerwise cross-scanning*. 1990. Spojené státy americké. US5155324A. Uděleno Oct. 13, 1992. Zapsáno Nov. 9, 1990.
- [6] VAROTSIS, Alkaios. HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison. In: *3D Hubs* [online]. 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>
- [7] JONES, Gordon. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [8] MURPHY, James. Selective Laser Melting (SLM) – 3D Printing Simply Explained. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
- [9] REDAKCE SHW, . 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. In: *SVĚT HARDWARE* [online]. c1998-2020 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>

- [10] Co je RepRap?. *Josef Průša* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/co-je-reprap/>
- [11] POHOŘELSKÝ, Zbyněk. FDM technologie (Fused Deposition Modeling). In: *Inventor 3D blog: Blog o používání programu Autodesk Inventor* [online]. c2012-2019 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/>
- [12] KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. 1. vydání. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 9788025148761.
- [13] 3D Scanning Technology — Hard Work That Looks Like “Magic”. In: *Laser Design: A CyberOptics Corporation Brand* [online]. Minneapolis, 2020 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>
- [14] ZUZA, Mikolas. Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. In: *Josef Průša* [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>
- [15] 3D skenování: Oskenujeme jakýkoliv předmět do světa jedniček a nul. *ELKO Metal Parts: Kovové díly nejen pro automotive* [online]. Kosova Hora [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://elko-mp.cz/vyrobni-technologie/3d-skenovani/>
- [16] What is an STL file?. *Sculpteo* [online]. Villejuif, c2009-2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/what-is-an-stl-file/>
- [17] Prototype. *Merriam-Webster: Dictionary* [online]. Last Updated 4 Apr 2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/prototype>
- [18] Prusament PLA Jet Black: 3D Filament 1Kg-1,75mm. In: *CostruzioneDroni* [online]. Torino, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.costruzionedroni.it/prusament-pla-jet-black-3d-filament-1kg-175mm>
- [19] PLA. In: *3D-tisk.cz* [online]. Nová média, 2019 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla/>

- [20] Rozdíl mezi ABS,PLA, PETG. In: *MATERIALPRO 3D* [online]. 2020 [cit. 2020-04-06].  
Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [21] Přehled dostupných materiálů. In: *Na3D* [online]. Valašské Meziříčí [cit. 2020-04-11].  
Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [22] GIANG, Ken. PLA vs. ABS: What's the difference?. In: *3D Hubs* [online]. 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference/>
- [23] ABS. In: *Simplify3D* [online]. 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>
- [24] ASA. In: *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [25] LOCKER, Anatol. The PETG Filament Buyer's Guide. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>
- [26] KOČÍ, Jakub. Jak tisknout s flexibilním filamentem. In: *Josef Průša* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-tisknout-s-flexibilnim-filamentem/>
- [27] KONDO, Hironori. TPE Filament: The Basics & Best Brands. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/tpe-filament-explained-and-compared/>
- [28] CHAVAN, Abhimanyu. Nylon 3D Printer Guide: All About 3D Printing Nylon. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/nylon-3d-printing-how-to-get-nylon-3d-printed/>
- [29] BURR, Eldon. Polycarbonate (PC) 3D Printing – All You Need to Know. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/polycarbonate-pc-3d-printing-all-you-need-to-know/>
- [30] KONDO, Hironori. 3D Printing Polypropylene: How to 3D Print with PP. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printing-polypropylene-how-to-3d-print-with-pp/>

- [31] ColorFabb bronzeFill Metal Filament - 1.75mm (0.75kg). In: *MatterHackers* [online]. Lake Forest, 2020 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-filament/colorfabb-bronzefill-175-750g>
- [32] FLYNT, Joseph. The Curious Case of Conductive Filaments. In: *3D Insider* [online]. Christchurch (New Zealand), 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/conductive-filament/>
- [33] FLYNT, Joseph. Magnetic Filaments: Properties, Applications, How to Use Them, and Best Brands. In: *3D Insider* [online]. Christchurch (New Zealand), 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/magnetic-filament/>
- [34] KING, Mike. Guide for Functional 3D filaments like Carbon fiber filament & more!. In: *Pinshape Blog* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/functional-filament-guide-carbon-fiber-filament/>
- [35] ABS Tech-Line filament termosensitivní červená/bílá 1,75 mm Herz 1 kg. In: *GIGA PC* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.giga-pc.cz/abs-1-75-mm/abs-tech-line-filament-termosensitivni-cervena-bila-1-75-mm-herz-1-kg/>
- [36] The PLA Filament Buyer's Guide. In: *All3DP* [online]. München [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/pla-filament-3d-printing/>
- [37] JAK JE DEFINOVÁN POJEM SAMOZHÁŠIVOST?. In: *KOPOS* [online]. Kolín [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.kopos.cz/cs/faq/713-jak-je-definovan-pojem-samozhasivost>
- [38] FRJET FILAMENT SAMOZHÁŠIVÝ BÍLÝ 1,75MM FILAMENT PM 0,5KG. In: *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/petg-filamenty/frjet-filament-samozhasivy-bily-1-75mm-filament-pm-0-5kg/>
- [39] ABS F.P. FILAMENT PŘÍRODNÍ 1,75 MM SMARTFIL 750 G. In: *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/abs-filamenty/abs-f-p--filament-prirodni-1-75-mm-smartfil-750-g/>



- [40] Polymaker PolyCast. In: *3Dwiser: Power of 3D printing* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/tiskove-struny/polymaker-polycast/>
- [41] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [42] ESD. In: *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/esd/>
- [43] FLYNT, Joseph. Glow in the Dark Filaments. In: *3D Insider* [online]. 2020 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/glow-in-the-dark-filament/>
- [44] PVA. In: *Simplify3D* [online]. 2020 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pva/>
- [45] GOEHRKE, Sarah. Additive Manufacturing Is Driving The Future Of The Automotive Industry. In: *Forbes* [online]. 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/sarahgoehrke/2018/12/05/additive-manufacturing-is-driving-the-future-of-the-automotive-industry/#472b8c1375cc>
- [46] How Ford Motor Company is Innovating 3D Printing for the Automotive Industry: Expert Interview with Harold Sears. In: *AMFG: Autonomous Manufacturing* [online]. London [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2019/01/08/ford-motor-company-3d-printing-harold-sears-interview/?cn-reloaded=1>
- [47] Business cases: 3D printing in the automotive industry. In: *Beamlar: Additive Manufacturing* [online]. Amsterdam, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.beamlar.com/3d-printing-in-the-automotive-industry/>
- [48] GERDEEN, James a Ronald RORRER. *Engineering Design with Polymers and Composites* [online]. Second Edition. Boca Raton (Florida): Taylor & Francis Group, 2012 [cit. 2020-05-28]. ISBN 978-1-4398-6053-6. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upce-ebooks/detail.action?docID=1449722>.
- [49] KLAHN, Christoph a Mirko MEBOLDT, Alexander STARK, ed. Additive Manufacturing: Cost Factors and Cost Optimization. In: *SPOTLIGHTMETAL: the network for light metal casting* [online]. Nürnberg: Vogel Communications Group, 2020

- [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.spotlightmetal.com/additive-manufacturing-cost-factors-and-cost-optimization-a-734518/>
- [50] SHER, Davide. How major automakers use AM for production today, part 5: BMW additive manufacturing. In: *3D Printing Media Network* [online]. 2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/bmw-additive-manufacturing/>
- [51] FARISH, Mike. BMW takes additive manufacturing from prototype to serial lines. In: *Automotive Manufacturing Solutions* [online]. 2019 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/additive/3d-printing/bmw-takes-additive-manufacturing-from-prototype-to-serial-lines/39753.article>
- [52] Brake Calipers and Wheels? Now from a 3D printer!. In: *VOLKSWAGEN: AKTIENGESELLSCHAFT* [online]. 2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2018/12/brake-calipers-and-wheels-now-from-a-3d-printer.html>
- [53] SHER, Davide. How major automakers use AM for production today, part 8: Jaguar Land Rover additive manufacturing. In: *3D Printing Media Network* [online]. 2020 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/jaguar-land-rover-additive-manufacturing/>
- [54] BMW i8. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/BMW\\_i8](https://en.wikipedia.org/wiki/BMW_i8)
- [55] Mercedes-Benz replacement parts from the 3D printer. In: *Mercedes-Benz* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.com/en/classic/classic-service-parts/next-generation-mercedes-benz-replacement-parts-from-3d-printer/>
- [56] STIPEK, Rob. FDM Additive Manufacturing and its Impact on the Automotive Industry. In: *Computer Aided Technology* [online]. Birmingham, 2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.cati.com/blog/2016/08/fdm-additive-manufacturing-impact-automotive-industry/>
- [57] Tensile Test. In: *Engineering Archives* [online]. c2008-2012 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: [http://www.engineeringarchives.com/les\\_mom\\_tensiletest.html](http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html)

- [58] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 1. Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2020-05-14]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [59] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S. In: *Prusa Research: Official Josef Prusa shop* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html>
- [60] SCOTT, Clare. German RepRap Introduces the X400 PRO V3, Featuring DD3 Extruder Technology and Other Improvements. In: *3DPrint.com: The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing* [online]. 2020 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://3dprint.com/109509/german-reprap-x400-pro-v3/>
- [61] *RS PRO – Product datasheet PLA* [online]. In: . [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/7eed/0900766b8157ce85.pdf>
- [62] PRYOR, Charlie. The Definitive Guide to ASTM D882 - Tensile Testing of Thin Plastic Film. In: *Instron* [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.instron.us/testing-solutions/by-test-type/tension/astm-d882>
- [63] HEATBED MK2B. *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/elektro-dily/heatbed-mk2b/>
- [64] ELBL, Jan. *Návod pro práci s programem Slic3r* [online]. Brno, 2018, 10 s. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [https://www.vfu.cz/files/3130\\_71\\_vystup\\_Slic3r\\_manual.pdf](https://www.vfu.cz/files/3130_71_vystup_Slic3r_manual.pdf). Farmaceutická fakulta Veterinární a farmaceutické univerzity Brno.
- [65] CAIN, Perry. Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing. In: *3D Hubs* [online]. 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/>
- [66] CÍSAŘ, Dominik. K čemu slouží nastavení perimeters?. In: *Josef Průša* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters/>
- [67] *ČSN EN ISO 527-1. Plasty: stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

- [68] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty: stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [69] *German RepRap Material Safety Data Sheet: PLA* [online]. In: . [cit. 2020-07-20].  
Dostupné z: <https://bit.ly/3fOcqGX>
- [70] *Gembird - PLA Red, 1.75 mm, 1 kg: 3DP-PLA1.75-01-R* [online]. In: . [cit. 2020-07-20].  
Dostupné z: <https://gmb-online.nl/egmb/ProductSheet.aspx?id=8857&lang=1>

## Seznam příloh

Příloha A: Popis základních vstupních parametrů sliceru pro vygenerování G-code .....	70
Příloha B: Výtah z normy o hodnotách tahových zkoušek [67] .....	73
Příloha C: Tvar a rozměry zkušebních vzorků [68] .....	75
Příloha D: Tabulka rozměrů pracovní oblasti vzorků získaných posuvným měřidlem.....	76
Příloha E: Průběh tahové zkoušky zaznamenaný kamerou video průtahoměru Shimadzu TRViewX.....	77
Příloha F: Fotografie vzorků sad 4, 5 a 6 po tahových zkouškách .....	78
Příloha G: Vlastnosti filamentů udávané od výrobců [61; 69; 70] .....	79
Příloha H: Grafy z tahových zkoušek .....	80
Příloha I: Ukázka části G-code jednoho z tištěných dílů .....	84

## Příloha A: Popis základních vstupních parametrů sliceru pro vygenerování G-code

### ▪ Teplota extrudéru

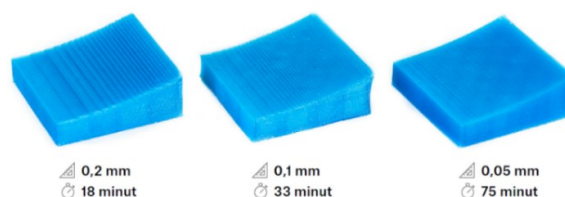
Nastavení teploty extrudéru je pro tisk naprosto fundamentální a je dáno především použitým filamentem. U každého filamentu je výrobcem udán rozsah teplot, v jakém by měl tisk daným materiálem probíhat. Nastavená teplota má vliv na průběh tisku a na výsledné vlastnosti a vzhled výtisku. Stejný materiál od různých výrobců může mít různé vhodné nastavení teplot extrudéru. Především u materiálů náročnějších na tisk může mít i malá změna teploty vliv na průběh tisku. Špatně nastavená teplota extrudéru může způsobit neúspěšný tisk. Nejčastěji se teploty tisku u běžných materiálů pohybují od 200 do 240 °C [2].

### ▪ Teplota podložky

U FDM 3D tiskáren vybavených vyhřívanou podložkou se nastavuje její teplota. Opět toto nastavení závisí na použitém filamentu. Vyhřívání napomáhá přichycení první vrstvy výtisku k podložce a při dalším průběhu tisku zabraňovat deformacím výtisku a tím jeho případnému odlepování od podložky. Tisk z některých materiálů přímo vyžaduje nebo je doporučováno použití vyhřívané podložky. Adheze neboli přilnutí k podložce se v případě nevyhřívané podložky dá docílit jinými způsoby, jako je použití modré malířské pásky, kaptonové pásky nebo běžného lepidla na papír [2; 12; 63].

### ▪ Výška vrstvy

Nastavení výšky vrstvy určuje především výslednou detailnost výtisku. Čím nižší výška vrstvy, tím méně budou jednotlivé vrstvy patrné. Současně se snižováním výšky vrstvy se ovšem zvyšuje čas tisku, protože tiskárna musí vytisknout více vrstev. Názorná ukázka rozdílů ve výškách vrstev je uvedena na obr. 65. Kompromisem může být nastavení detailnějšího tisku pouze v místech, kde tištěný model obsahuje detaily, tzv. variabilní výška vrstev. Tak se dosáhne potřebné kvality za přijatelný čas tisku [2].



Obrázek 65 Závislost kvality povrchu a doby tisku na výšce vrstvy [2]

- **Podpěry**

Slicer přidává pod převislé části nebo části modelu nemající styk s podložkou podpěry tak, aby byl 3D model vytisknutelný. Pokud převislá část svírá s podložkou úhel větší než 45°, tak je obvykle takové převisy možné vytisknout bez podpěr. Pokud je to možné, tak je vhodné počet podpěr z několika důvodů minimalizovat. Tisk podpěr prodlužuje dobu tisku a materiál podpěr je ze své podstaty pouze pomocný materiál pro úspěšný tisk, kdy je po tisku z modelu odstraněn a stává se z něho odpadový materiál. Dále povrch výtisku v místech styku s podpěrami je obvykle znatelně horší [2].

- **Rychlosti pohybu tiskové hlavy**

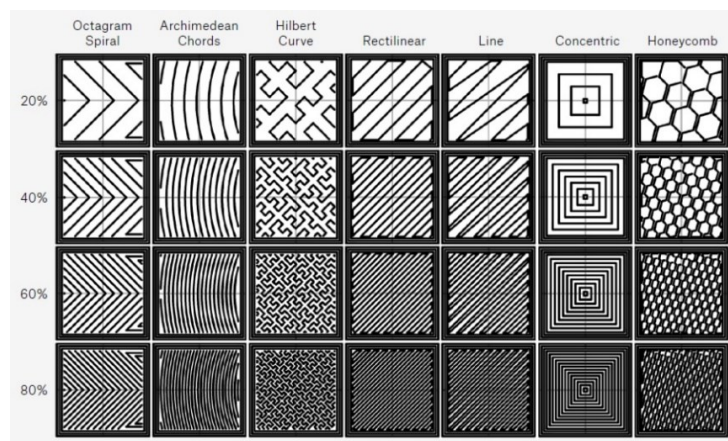
Nastavení rychlostí pohybu tiskové hlavy je možné nastavit jednotlivě pro tisk jednotlivých prvků (výplň, perimetr, podpěry, mosty, tisk první vrstvy, ...) a pro rychloposuv, kdy se tisková hlava pouze přemísťuje a nepokládá tiskový materiál. Hodnoty se udávají obvykle mm/s [64].

- **Chlazení**

Nastavení chlazení určuje, kdy je ventilátor chlazení na tisknutý objekt zapnutý a jakou intenzitou. Vhodné je použití především při rychlém tisku, kdy se před tiskem určité vrstvy nestíhá samovolně dostatečně zchladit a ztuhnout vrstva předchozí. Tento případ nastává např. u vysokých úzkých výtisků [2].

- **Výplň**

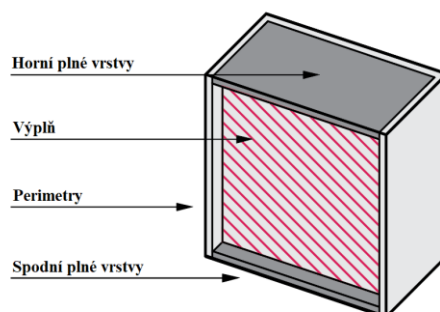
U nastavení výplně (vnitřní objem výtisku) se určuje její vzor a hustota v procentech, kdy běžně používaná hodnota je okolo 15 %. Vyšší hodnoty se používají např. při požadavku na vyšší pevnost výtisku či při aplikaci, kde je výtisk třeba spojovat šrouby a je tedy třeba plnější materiál pro dobré uchycení šroubu. V takovém případě se doporučuje hustota výplně alespoň 50 %. Pro dutý objekt se nastaví hodnota 0 %. Každý slicer nabízí širokou škálu vzorů. Na obr. 66 jsou některé možné vzory v závislosti na hustotě výplně vyobrazeny. Nastavení těchto parametrů má vliv na dobu tisku, výslednou pevnost výtisku (též směry pevnosti) a spotřebu filamentu [2; 65].



Obrázek 66 Ukázka vzorů výplně [2]

- **Plné vrstvy**

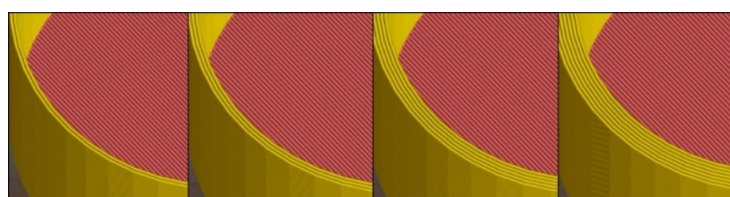
S výplní souvisí nastavení plných vrstev. Nastavuje se vždy určitý počet prvních spodních vrstev a posledních horních vrstev, které budou mít plnou 100 % hustotu výplně se stejným nebo odlišným vzorem jako výplň uvnitř výtisku (viz. obr. 67) [2].



Obrázek 67 Složení FDM 3D výtisku [65]

- **Perimetry**

Nastavení počtu perimetrů udává, kolika vlákny bude tvořen vnější plášť, resp. boční stěny výtisku (viz. obr. 67). Tloušťka bočních stěn tedy bude přibližně průměr trysky násobený počtem perimetrů. Stejný výtisk ve fázi přípravy ve sliceru s nastavenými různými počty perimetrů je uveden na obr. 68 [2; 66].



Obrázek 68 Nastavení počtu perimetrů (zleva: 2, 3, 5, 7) [66]



## Příloha B: Výtah z normy o hodnotách tahových zkoušek [67]

### ▪ Smluvní napětí ( $\sigma$ )

Smluvní napětí je napětí v materiálu, které se vztahuje vždy k výchozímu průřezu vzorku před tahovou zkouškou. Vypočítá se dle vztahu (1):

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (1)$$

kde  $F$  – zatěžovací síla [N];  $S_0$  – výchozí průřez vzorku [ $\text{mm}^2$ ].

### ▪ Skutečné napětí ( $\sigma_s$ )

Stejně jako smluvní napětí je skutečné napětí poměr zatěžovací síly  $F$  k průřezu vzorku, ale průřezu aktuálnímu, nikoliv výchozímu. Vypočítá se tedy dle vztahu (2):

$$\sigma_s = \frac{F}{S} [MPa] \quad (2)$$

kde  $S$  – aktuální průřez vzorku [ $\text{mm}^2$ ].

### ▪ Relativní prodloužení ( $\varepsilon$ )

Relativní prodloužení je bezrozměrná veličina, někdy udávaná v procentech, která představuje poměr prodloužení pracovní oblasti vzorku o konstantním průřezu  $\Delta L_0$  k původní délce téže části vzorku  $L_0$  dle vztahu (3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100 [\%] \quad (3)$$

kde  $\Delta L_0$  – prodloužení vzorku [mm];  $L_0$  – výchozí délka vzorku [mm].

### ▪ Jmenovité relativní prodloužení ( $\varepsilon_t$ )

Jmenovité relativní prodloužení se na rozdíl od předchozího relativního prodloužení určuje z upínací délky vzorku mezi čelistmi univerzálního zkušebního stroje a jejich posunutím. Tato metoda výpočtu se používá v případě, kdy se na vzorku projevuje velká plastická deformace tvorbou krčku nebo při absenci použití průtahoměru, která je pro předchozí metodu nutností. Výpočet se provádí dle vztahu (4):

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \times 100 [\%] \quad (4)$$

kde  $L_t$  – posunutí čelistí [mm];  $L$  – upínací vzdálenost mezi čelistmi [mm].

Dále se určují následující materiálové charakteristiky:

- **Mez pevnosti v tahu ( $R_m$ )**

Pevnost v tahu je maximální hodnota napětí v tahu na deformační křivce vzorku, která odpovídá maximální zatěžovací síle  $F_m$ . Může se jednat o napětí při přetržení vzorku, ale také nemusí. Pro výpočet platí následující vztah (5):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (5)$$

kde  $F_m$  – maximální zatěžovací síla [N];  $S_0$  – výchozí průřez vzorku [mm<sup>2</sup>].

- **Napětí na mezi kluzu ( $R_e$ )**

Při dosažení napětí meze kluzu se na zkušebním vzorku začínají vznikat plastické deformace materiálu, které jsou nevratné a vzniká tzv. krček. V podstatě dochází k prodloužení zkušebního vzorku bez dalšího růstu zatěžovací síly. Některé materiály mají výraznou mez kluzu, ale např. křehké materiály ji nemají a prasknou bez výrazných plastických deformací. Výpočet lze zapsat vztahem (6):

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa] \quad (6)$$

kde  $F_e$  – zatěžovací síla na mezi kluzu [N];  $S_0$  – výchozí průřez vzorku [mm<sup>2</sup>].

- **Youngův modul pružnosti ( $E$ )**

Youngův modul pružnosti je materiálová charakteristika vyjadřující jeho tuhost. Čím vyšší hodnota modulu pružnosti, tím je materiál tužší. Stanovuje se v oblasti deformační křivky, kde platí Hookův zákon – platí lineární závislost napětí na relativním prodloužení. Po jednoduché úpravě Hookova zákona lze modul pružnosti vyjádřit následujícím vztahem (7):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (7)$$

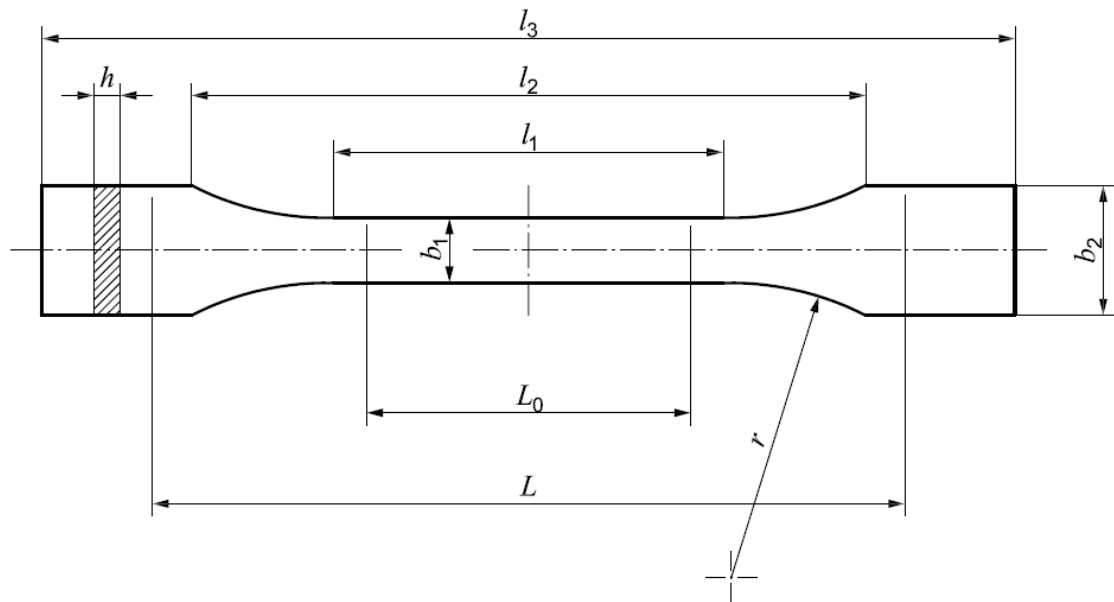
- **Tažnost ( $A$ )**

Tažnost materiálu je celkové relativní prodloužení při přetržení materiálu a lze určit následujícím vztahem (8):

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 [\%] \quad (8)$$

kde  $L_0$  – výchozí délka vzorku [mm];  $L_u$  – délka vzorku při přetržení [mm].

## Příloha C: Tvar a rozměry zkušebních vzorků [68]



Dimensions in millimetres

	Specimen type	1A	1B
$l_3$	Overall length <sup>a</sup>	170	≥150
$l_1$	Length of narrow parallel-sided portion	80 ± 2	60,0 ± 0,5
$r$	Radius	24 ± 1	60 ± 0,5
$l_2$	Distance between broad parallel-sided portions <sup>b</sup>	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
$b_2$	Width at ends	20,0 ± 0,2	
$b_1$	Width at narrow portion	10,0 ± 0,2	
$h$	Preferred thickness	4,0 ± 0,2	
$L_0$	Gauge length (preferred)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
	Gauge length (acceptable if required for quality control or when specified)	50,0 ± 0,5	
$L$	Initial distance between grips	115 ± 1	115 ± 1

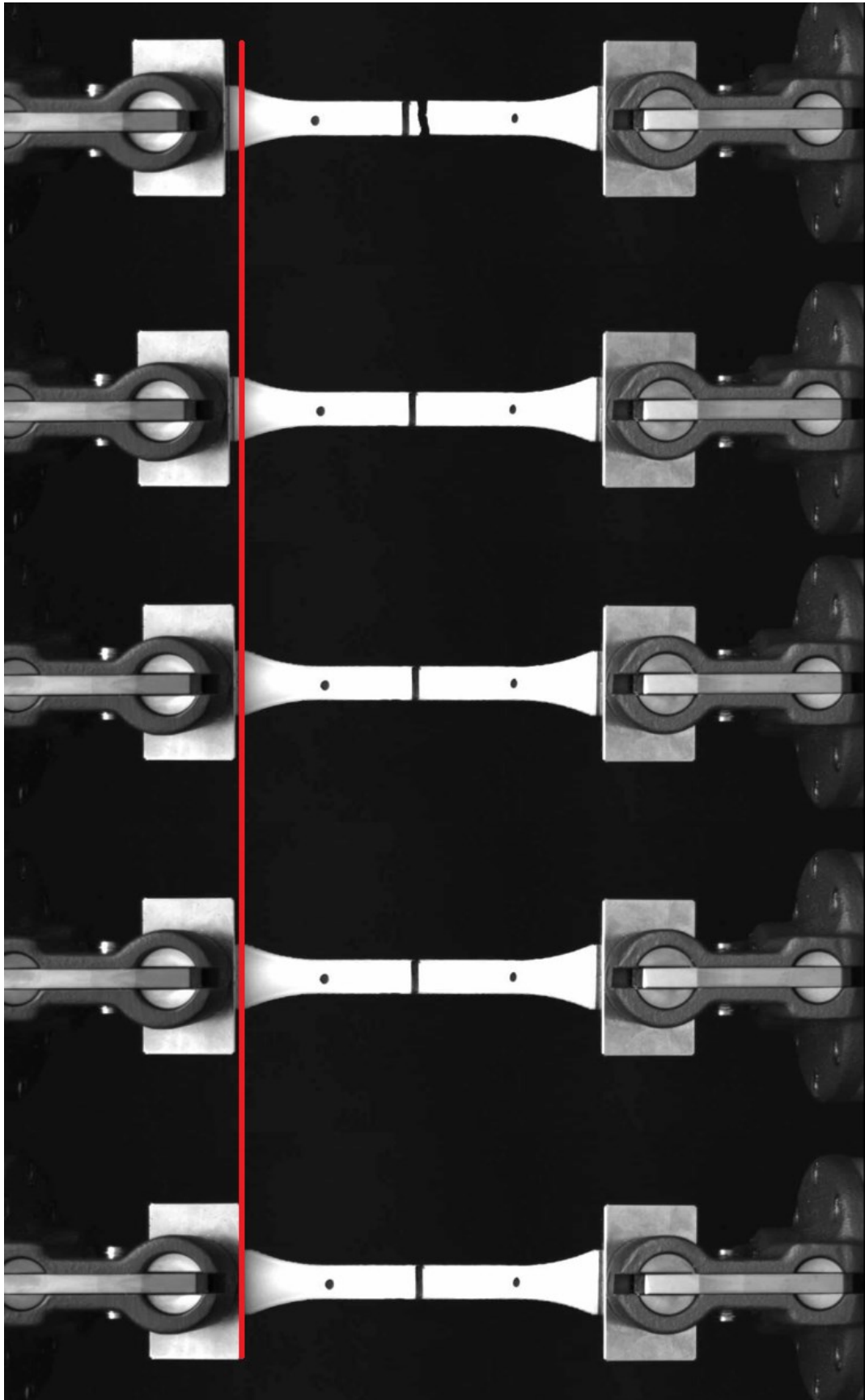
<sup>a</sup> The recommended overall length of 170 mm of the type 1A is consistent with ISO 294-1 and ISO 10724-1. For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g.  $l_3 = 200$  mm) to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

<sup>b</sup>  $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$ , resulting from  $l_1$ ,  $r$ ,  $b_1$  and  $b_2$ , but within the indicated tolerances.

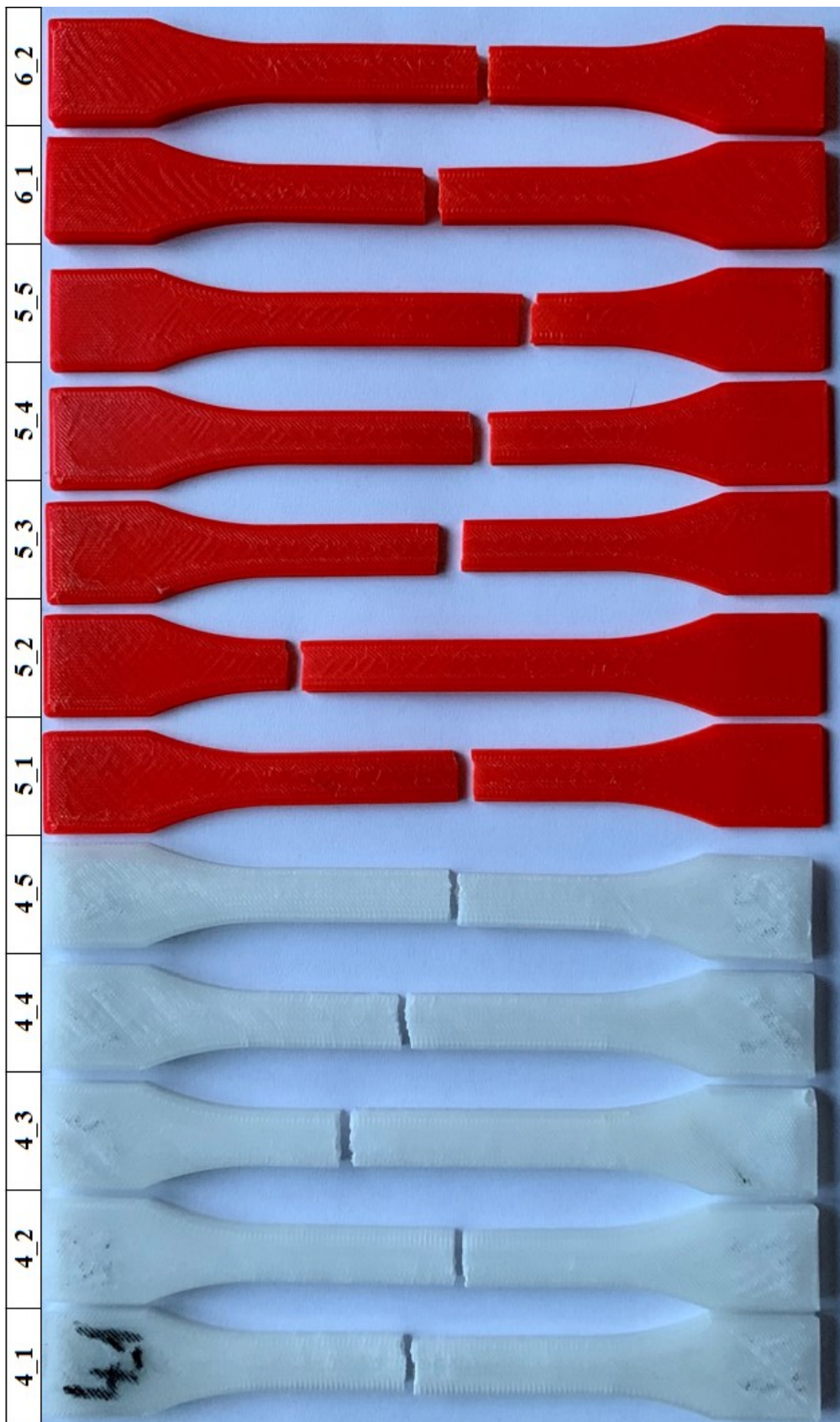
## Příloha D: Tabulka rozměrů pracovní oblasti vzorků získaných posuvným měřidlem

Vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]
1_1	10,04	3,45	3_4	10,64	4,06
1_2	9,86	4,44	4_1	10,09	4,5
1_3	9,99	4,68	4_2	10,09	4,8
1_4	10,18	4,18	4_3	10,2	4,5
1_5	10,05	4,47	4_4	10,15	4,4
2_1	10,39	4,07	4_5	10,18	4,4
2_2	10,88	4,25	5_1	10,51	1,9
2_3	10,48	3,95	5_2	10,48	1,87
2_4	10,71	3,98	5_3	10,45	1,9
2_5	10,56	3,97	5_4	10,1	1,9
3_1	10,79	4,29	5_5	10,1	1,88
3_2	10,82	4,09	2_1	10,11	3,99
3_3	10,81	4,24	2_2	10,09	4,03

**Příloha E: Průběh tahové zkoušky zaznamenaný kamerou video průtahoměru Shimadzu TRViewX**



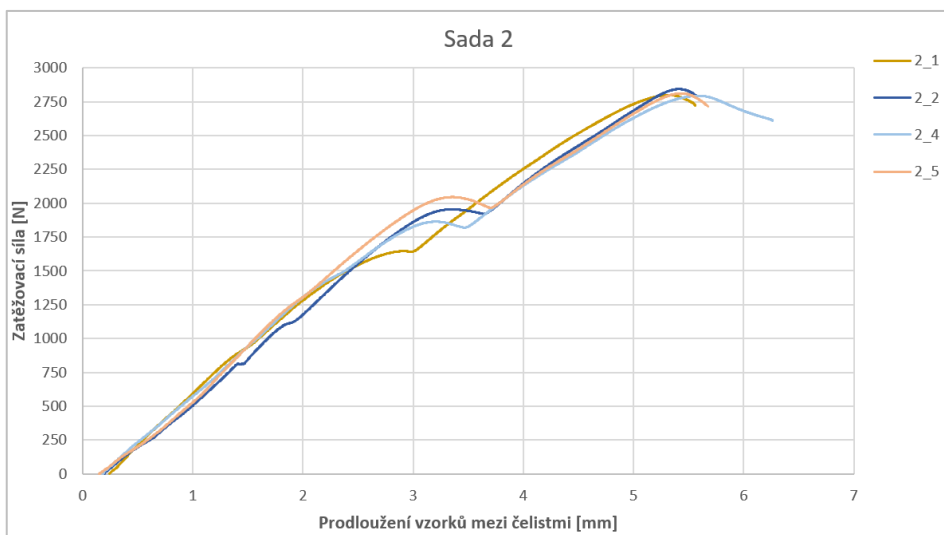
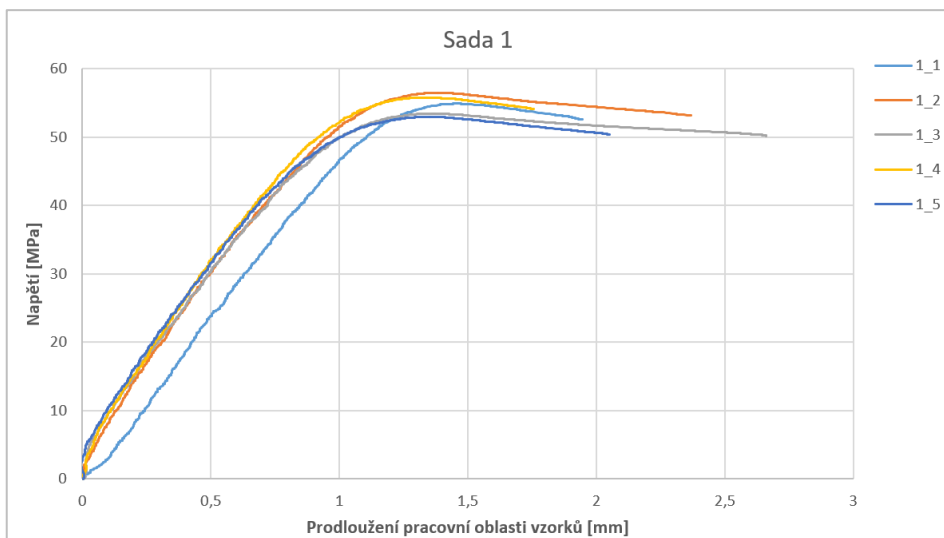
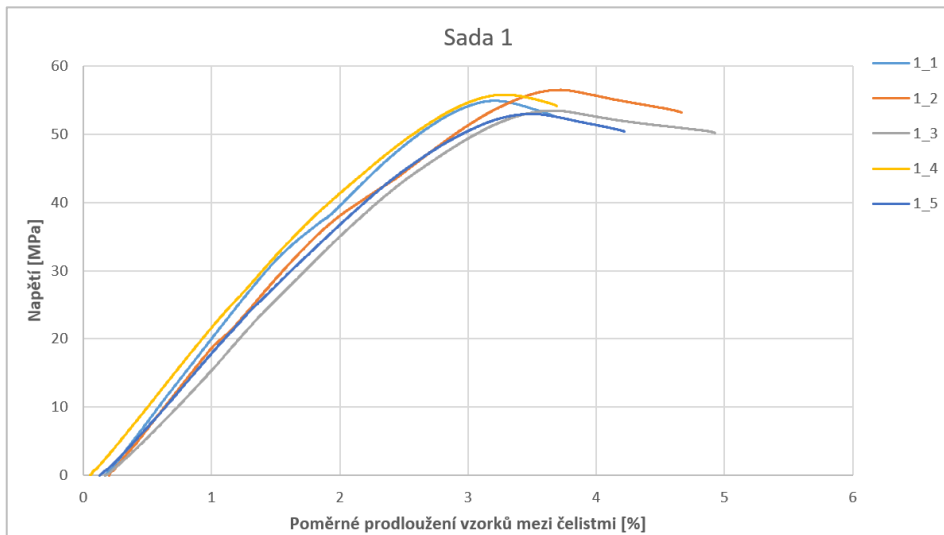
**Příloha F: Fotografie vzorků sad 4, 5 a 6 po tahových zkouškách**



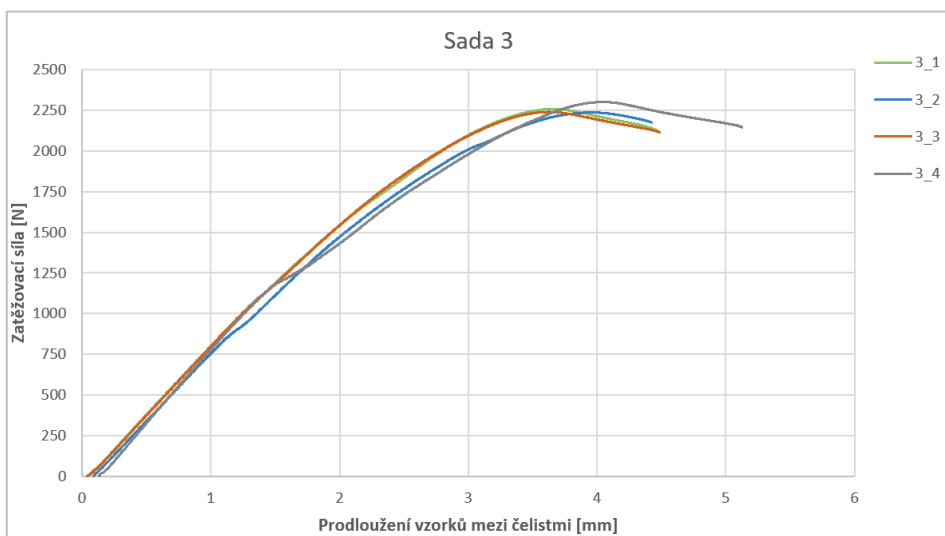
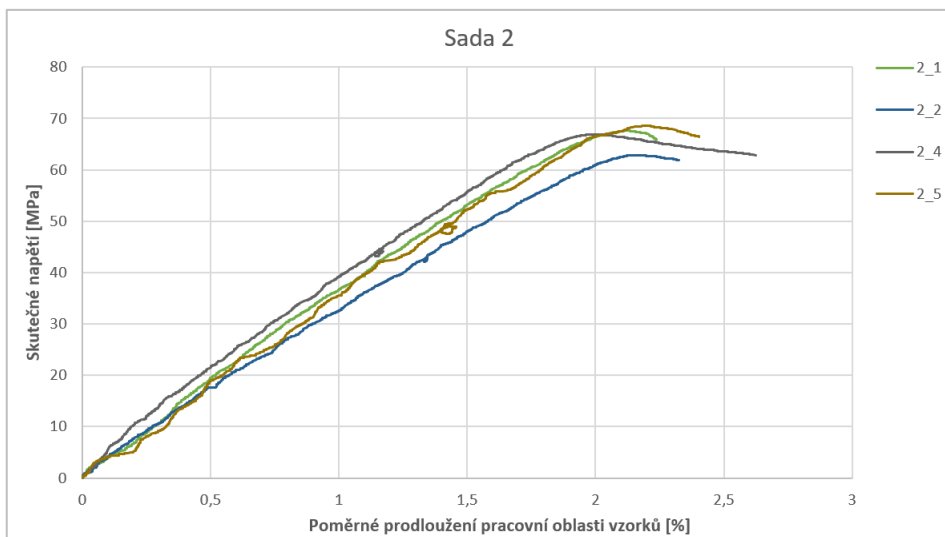
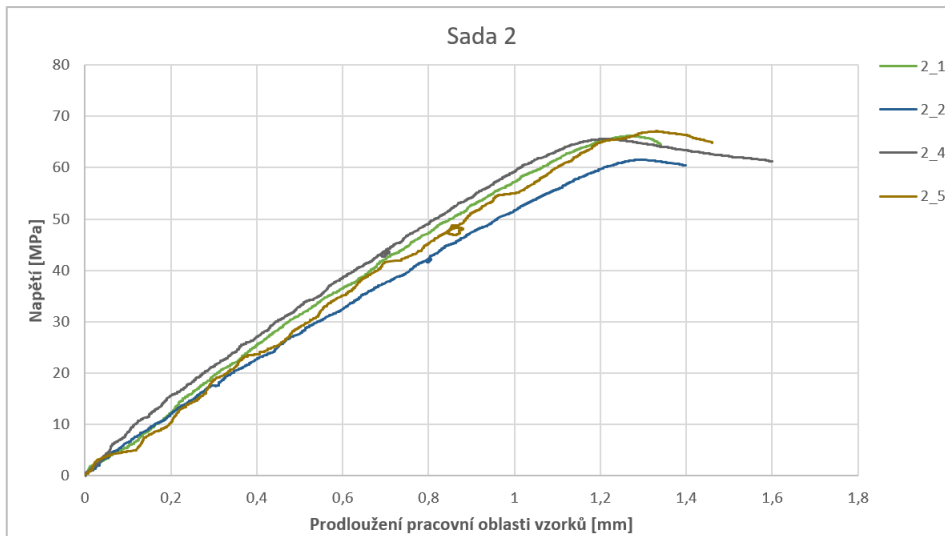
# Příloha G: Vlastnosti filamentů udávané od výrobců [61; 69; 70]

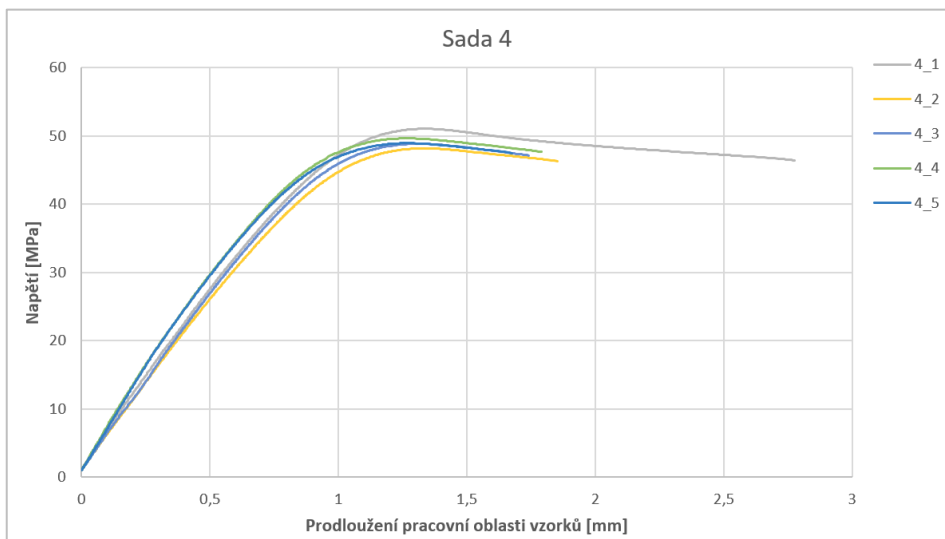
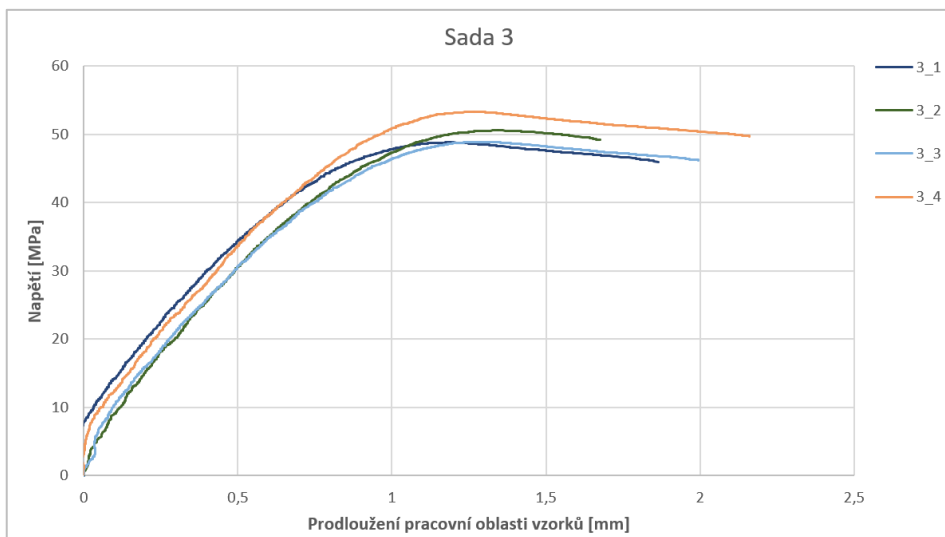
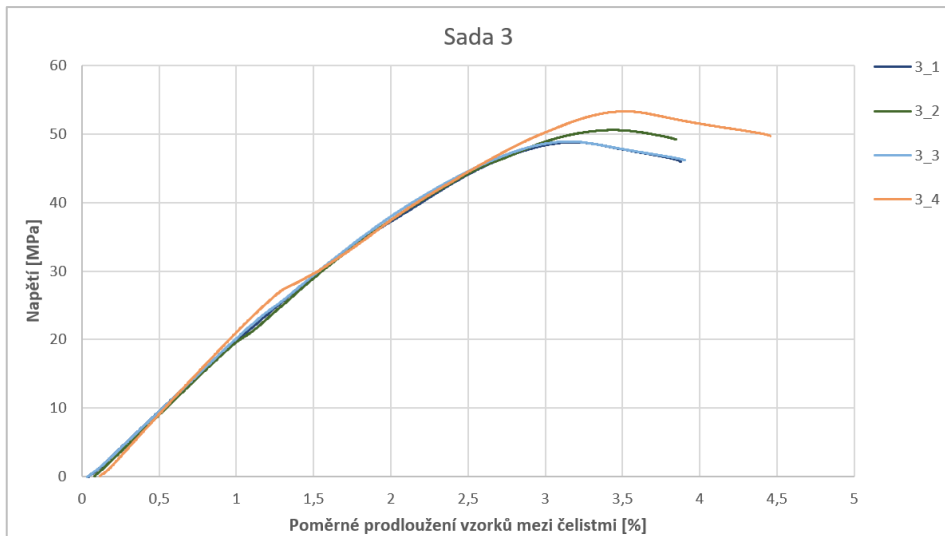
German RepRap 100505 PLA	Gembird 3DP-PLA1.75-01-R	RS PRO Black PLA																																				
<p><b>SECTION 8: Physical and chemical properties</b></p> <p>8.1 Information on basic physical and chemical properties</p> <p>Appearance: monofilament</p> <p>Aggregate state: Solid</p> <p>Smell: Odourless</p> <p>Softening temperature: 170°C to 180°C (depending on type)</p> <p>Density: ca. 1,25 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Vapour pressure: not applicable</p> <p>Solubility in water (20 °C): insoluble</p> <p>Solubility in solvents: soluble in some solvents</p> <p>Temperature of decomposition: ≥ 270°C (depending on type)</p> <p>8.2 Other Information None</p>	<p><b>Specifications</b></p> <p>Material: PLA, 1.75 mm diameter</p> <p>Weight: 1 kg/spool (2.2 lbs)</p> <p>Length: approx. 330 m</p> <p>Density at 21.5 °C: 1.25 g/cm<sup>3</sup></p> <p>Melt Flow Index at 10min, 2.16kg: 5</p> <p>Melt Point: 190-220 °C</p> <p>Heat-Deflection-Temperature at 0.455 MPa: 50 °C</p> <p>Yield Strength at 5mm/min: 45 MPa</p> <p>Impact Strength: 5 KJ/m<sup>2</sup></p> <p>Ensil Break: 20 %</p> <p>Diameter: 1.75 ± 0.05 mm</p>	<p><b>Physical properties</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Description</th> <th>Testmethod</th> <th>Typical value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Specific gravity</td> <td>ASTM D1505</td> <td>1,24 g/cc</td> </tr> <tr> <td>MFI</td> <td>-</td> <td>6,0 g/10 min</td> </tr> <tr> <td>Tensile strength</td> <td>ASTM D882</td> <td>110 MPa (MD) 145 MPa (TD)</td> </tr> <tr> <td>Elongation at break</td> <td>ASTM D882</td> <td>160% (MD) 100% (TD)</td> </tr> <tr> <td>Tensile modulus</td> <td>ASTM D882</td> <td>3310 MPa (MD) 3860 Mpa (TD)</td> </tr> <tr> <td>Impact Strength</td> <td>-</td> <td>7,5 KJ/m<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Thermal properties</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Description</th> <th>Testmethod</th> <th>Typical value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>printing temp.</td> <td>-</td> <td>180-210 °C</td> </tr> <tr> <td>melting temp.</td> <td>-</td> <td>210 °C ± 10 °C</td> </tr> <tr> <td>melting point</td> <td>ASTM D3418</td> <td>145-160 °C</td> </tr> <tr> <td>vicat softening temp.</td> <td>ISO 306</td> <td>± 60 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Description	Testmethod	Typical value	Specific gravity	ASTM D1505	1,24 g/cc	MFI	-	6,0 g/10 min	Tensile strength	ASTM D882	110 MPa (MD) 145 MPa (TD)	Elongation at break	ASTM D882	160% (MD) 100% (TD)	Tensile modulus	ASTM D882	3310 MPa (MD) 3860 Mpa (TD)	Impact Strength	-	7,5 KJ/m <sup>2</sup>	Description	Testmethod	Typical value	printing temp.	-	180-210 °C	melting temp.	-	210 °C ± 10 °C	melting point	ASTM D3418	145-160 °C	vicat softening temp.	ISO 306	± 60 °C
Description	Testmethod	Typical value																																				
Specific gravity	ASTM D1505	1,24 g/cc																																				
MFI	-	6,0 g/10 min																																				
Tensile strength	ASTM D882	110 MPa (MD) 145 MPa (TD)																																				
Elongation at break	ASTM D882	160% (MD) 100% (TD)																																				
Tensile modulus	ASTM D882	3310 MPa (MD) 3860 Mpa (TD)																																				
Impact Strength	-	7,5 KJ/m <sup>2</sup>																																				
Description	Testmethod	Typical value																																				
printing temp.	-	180-210 °C																																				
melting temp.	-	210 °C ± 10 °C																																				
melting point	ASTM D3418	145-160 °C																																				
vicat softening temp.	ISO 306	± 60 °C																																				

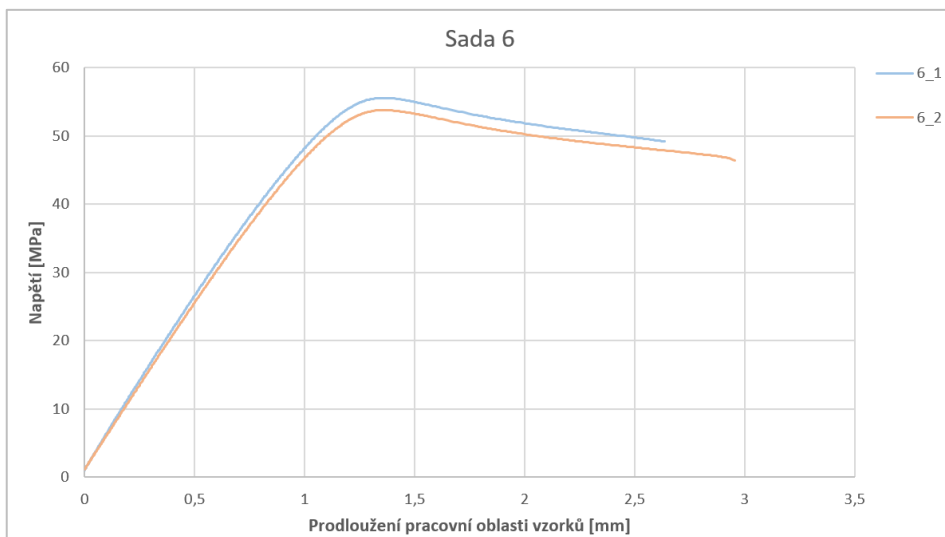
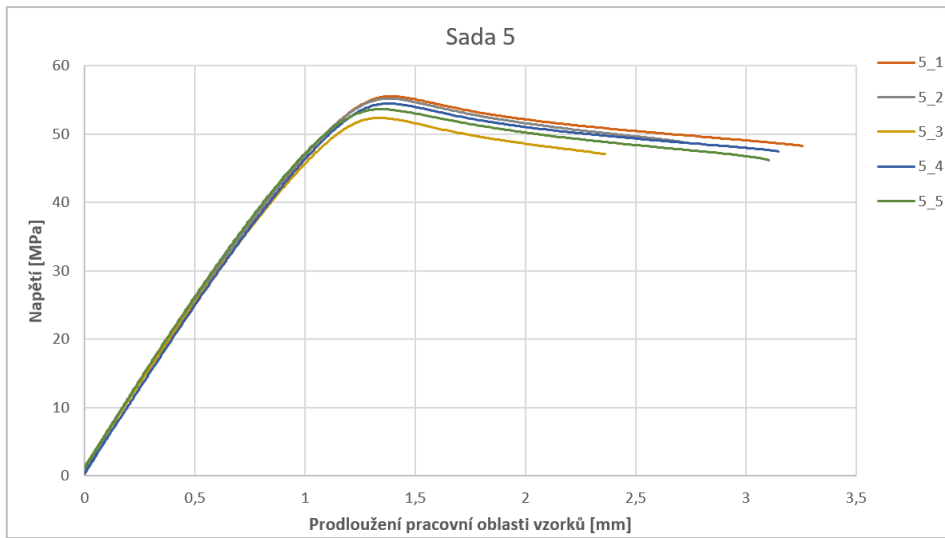
## Příloha H: Grafy z tahových zkoušek











## Příloha I: Ukázka části G-code jednoho z tištěných dílů

```
G90
M82
M106 S0
M140 S65
M190 S65
M104 S215 T0
M104 S0 T1
M109 S215 T0
G28 ; home all axes
; process Process1
; layer 1, Z = 0.252
T0
G92 E0.0000
G1 E-1.0000 F5802
; feature skirt
; tool H0.252 W0.360
G1 Z0.252 F1002
G1 X157.920 Y246.710 F4800
G1 E0.0000 F5802
G92 E0.0000
G1 X169.935 Y246.710 E0.4350 F1800
G1 X171.435 Y248.210 E0.5118
G1 X204.435 Y248.210 E1.7067
G1 X205.935 Y249.710 E1.7835
G1 X210.435 Y249.710 E1.9465
G1 X215.437 Y254.713 E2.2026
G1 X215.437 Y257.713 E2.3113
G1 X221.437 Y263.713 E2.6185
G1 X221.437 Y289.228 E3.5423
G1 X215.437 Y295.228 E3.8496
G1 X215.437 Y298.228 E3.9582
G1 X210.435 Y303.230 E4.2144
G1 X205.935 Y303.230 E4.3773
G1 X204.435 Y304.730 E4.4541
G1 X171.435 Y304.730 E5.6490
G1 X169.935 Y306.230 E5.7258
G1 X157.920 Y306.230 E6.1608
G1 X152.917 Y301.228 E6.4170
G1 X152.917 Y290.713 E6.7977
G1 X154.410 Y289.220 E6.8742
```