



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# ADITIVNÍ VÝROBA MONTÁŽNÍCH A LISOVACÍCH PŘÍPRAVKŮ TECHNOLOGIÍ FDM

ADDITIVE MANUFACTURING OF FIXTURES FOR ASSEMBLY AND PRESSING BY FDM

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN GREGORA

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAKUB SLAVÍČEK

BRNO 2023



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Jan Gregora**  
Studijní program: Základy strojíního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojíního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Slaviček**  
Akademický rok: 2022/23

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

## **Aditivní výroba montážních a lisovacích přípravků technologií FDM**

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

Prototypová výroba přípravků je při použití konvenčních výrobních postupů velice nákladná a časově náročná. Takové přípravky pak mnohdy slouží jen k několika málo montážním operacím a poté ztrácí své využití. Nahrazení konvenční výroby aditivními technologiemi by mohlo vést ke zrychlení procesu výroby, snížení nákladů na výrobu a k celkovému zefektivnění procesu přípravy montážních přípravků. Nahrazení kovových konvenčně vyráběných dílů za plastové díly vyráběné aditivně povede na konstrukční úpravy tvaru přípravku a s tím spojené změny tuhosti a únosnosti celku.

Typ práce: vývojová – konstrukční

### **Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem bakalářské práce je zhodnotit vhodnost využití 3D tisku plastu při prototypové výrobě montážních a lisovacích přípravků. Práce se bude zaměřovat na vývoj 1 přípravku pro lisování a 1 přípravku pro šroubování.

Díličí cíle bakalářské práce:

- rešerše a výběr vhodného materiálu a jeho pevnostních charakteristik,
- návrh vzorků a realizace dílčích testů pro zjištění hraničních hodnot zatížení,
- tvorba 3D modelu prototypu přípravku pro šroubování a lisování,
- porovnání vlastností plastového a kovového přípravku při reálné montáži,
- porovnání časů a nákladů výroby.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

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

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

KHAN, Saifuddin, Ketan JOSHI a Samadhan DESHMUKH, 2021. A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. In: Materials Today: Proceedings [online]. B.m.: Elsevier Ltd, s. 2119–2127. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.09.433

POPESCU, Diana, Aurelian ZAPCIU, Catalin AMZA, Florin BACIU a Rodica MARINESCU, 2018. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. Polymer Testing [online]. 69, 157–166. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2018.05.020

SOLOMON, I. John, P. SEVVEL a J. GUNASEKARAN, 2020. A review on the various processing parameters in FDM. In: Materials Today: Proceedings [online]. B.m.: Elsevier Ltd, s. 509–514. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.05.484

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývala konstrukcí přípravků určených pro prototypovou montáž termoregulačních modulů. Jedním z cílů práce bylo zhodnotit vhodnost použití FDM tisku pro výrobu prototypových přípravků. FDM přípravky mají za cíl nahradit doposud využívané přípravky kovové. Motivací pro využití aditivní metody výroby bylo zlevnění a urychlení výroby v rámci prototypového oddělení Schaeffler Production CZ, s.r.o. V rámci práce byl naměřen vliv plošného zatížení na 3D tištěný materiál PETG, který byl v rámci práce zvolen jako konstrukční materiál. Výsledky tohoto měření a poznatky z rešeršní části byly využity pro MKP analýzu a konstrukci přípravku. Z porovnání ekonomičnosti a rychlosti výroby prototypových přípravků vychází jednoznačně lépe použití aditivních technologií.

## **Klíčová slova**

3D tisk, FDM, montáž, přípravek

## **Summary**

This bachelor thesis dealt with the design of fixtures for prototype assembly of thermoregulating modules. One of the aims of the thesis was to evaluate the suitability of using FDM printing for the production of prototype fixtures. FDM fixtures are intended to replace the metal fixtures used to date. The motivation for the use of additive manufacturing was to make production cheaper and faster within the prototype department of Schaeffler Production CZ, s.r.o. The effect of the surface loading on the 3D printed PETG material, which was chosen as the construction material within the scope of the work, was measured. The results of this measurement and the findings from the research part were used for FEA analysis and design of the product. The comparison of the cost-effectiveness and the speed of the prototype fixture production clearly shows that the use of additive technologies is better.

## **Keywords**

3D printing, FDM, assembly, fixture

### **Bibliografická citace**

Gregora, J.. *Aditivní výroba montážních a lisovacích přípravků technologií FDM*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí Ing. Jakub Slaviček.

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Jakuba Slavíčka. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

Jan Gregora

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat společnosti Schaeffler Production CZ, s.r.o. za umožnění realizace bakalářské práce. Zejména konzultantovi za společnost Ing. Václavovi Vackovi, který byl odborným poradcem při řešení praktických záležitostí. Také vedoucímu práce Ing. Jakubovi Slavičkovi, který byl maximálně nápomocný během zpracování této práce.

Jan Gregora



# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>12</b>
2.1	3D tisk . . . . .	12
2.2	Metody 3D tisku . . . . .	12
2.3	Základní typy materiálů . . . . .	12
2.3.1	Porovnání vlastností . . . . .	13
2.3.2	Vliv hustoty výplně a vzor výplně . . . . .	15
2.4	Přístroje . . . . .	18
2.5	Termoregulační modul . . . . .	19
2.6	Operace prováděné na přípravcích . . . . .	21
2.6.1	Šroubování . . . . .	21
2.6.2	Lisování . . . . .	22
2.7	Druhy upínacích mechanismů . . . . .	23
2.8	Spojení 3D tištěných komponent . . . . .	24
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>26</b>
3.1	Analýza problému . . . . .	26
3.2	Cíl práce . . . . .	26
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>27</b>
4.1	Experimentální ověření deformace PETG . . . . .	27
4.1.1	Průběh měření . . . . .	27
4.1.2	Výsledky měření . . . . .	28
4.2	Predikce deformací pomocí metody konečných prvků . . . . .	30
4.3	Koncepční návrhy . . . . .	31
4.3.1	Přípravek pro operaci lisování . . . . .	31
4.3.2	Přípravek pro operaci šroubování . . . . .	32
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>34</b>
5.1	Volba řešení . . . . .	34
5.2	Konstrukce přípravků . . . . .	34
5.2.1	Přípravek určený pro operaci lisování . . . . .	34
5.2.2	Přípravek určený pro operaci šroubování . . . . .	35
5.3	Analýza zatížení v softwaru Ansys-Workbench . . . . .	36
5.4	Funkční test . . . . .	37
5.4.1	Funkční test přípravku pro operaci lisování . . . . .	38
5.4.2	Funkční test přípravku pro operaci šroubování . . . . .	39
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>41</b>
	<b>ZÁVĚR</b>	<b>43</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>48</b>

SEZNAM TABULEK	49
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	50
SEZNAM PŘÍLOH	51
A Naměřené grafy pro trny č. 1 a č. 3	52

# 1 ÚVOD

Implementace aditivní výroby do procesu prototypové výroby je v současnosti ve firmách běžně používanou praxí. Mezi výhody použití 3D tisku patří flexibilita, rychlost, cena a tvarová rozmanitost. Aditivní technologie se využívají jak pro samotné díly prototypových konstrukcí, tak pro s tím spjatou výrobu a kompletaci těchto prototypů. O řešení tohoto problému projevila zájem společnost Schaeffler Production CZ, s.r.o., přesněji jejich závod ve Svitavách, ve spolupráci s nímž jsem tuto práci vypracoval. Oddělení Prototypové montáže projevilo zájem o zmapování oblasti 3D tisku při výrobě přípravků pro montáž modulů.

Specifikum prototypové montáže je, že mohou být měněny rozměrové parametry montovaných modulů. Dochází tedy k tomu, že je v některých případech nutná úprava přípravků, aby bylo možné respektovat rozměrové a tvarové změny modulů. Doposud se pro montáž využívají přípravky kovové, vyráběné konvenčními metodami. Budu tedy porovnávat již zmíněné přípravky s aditivně vyráběnými FDM metodou 3D tisku, na které se tato práce zaměřuje s přípravky kovovými. Jedním problémů FDM metody 3D tisku je pevnostní popis tištěných součástí a to zejména kvůli nepřesnostem výroby a anizotropickému chování při zatěžování těles jako celku.

Vývoj FDM tištěných přípravků by měl přinést časově a nákladově efektivnější variantu, k zmíněným přípravkům kovovým a tedy napomoci flexibilitě prototypové montáže. Práce taktéž základně mapuje vliv tlakových zatížení na FDM tištěných součástí, které mají za cíl podpořit konstrukční možnosti přípravků. Výsledky z těchto testů jsou porovnány s analýzou provedenou pomocí metodou konečných prvků (MKP) v softwaru Ansys-Workbench. Rešeršní část se zabývá získáním parametrů použitého materiálu, jehož mechanické vlastnosti jsou ovlivněny několika faktory popsány v kapitole 2.3.1. Jedná se zejména o mechanické vlastnosti potřebné k popisu chování materiálu pro MKP analýzu.

FDM technologie se často využívá při výrobě součástí, které jsou tvarově složité a jinými metodami výroby obtížně vyrobitelné. Avšak přípravky většinou nejsou složeny z nějak komplikovaných částí, tedy je zapotřebí vzít v potaz i jiný pohled. Tímto pohledem můžou být náklady (finanční, časové a na zaměstnance). Taktéž z hlediska ergonomie, pevnosti a již zmíněné nutnosti modifikace. Dosavadní kovové přípravky si společnost vyrábí sama s využitím jiného závodu s rozsáhlou kovovýrobou. Ovšem tato výroba je velmi zatížena jinými zakázkami společnosti, jako je výroba dílů pro formy na vstřikování plastů a jejich opravu. Výroba kovových přípravků může být časově náročná záležitost. Schaeffler taktéž disponuje FDM výrobními technologiemi, které budou využité pro výrobu navrhnutých přípravků.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 3D tisk

3D tisk taktéž známý jako aditivní metoda výroby, neboli postupné nanášení roztaveného materiálu, vrstva po vrstvě s cílem vystavět součást, jakožto produkt CAD modelu. Základním principem této technologie je, že slicer software na základě vstupní geometrie naplánuje trajektorie pohybu a potřebné procesní parametry. [1] Jednou z hlavních výhod je, že výroba je nízkonákladová a efektivní s možností výroby složitých tvarů, které by byly jinou metodou nevyrobitelné.

### 2.2 Metody 3D tisku

#### Fused Deposition Modeling – FDM

Nanášení vrstev rozmanitých druhů plastů nebo vosků pomocí vyhřívané trysky, do které je materiál dodáván ve formě drátu. Možnost využití dvou trysek například pro tisk podpor a vlastní stavební materiál dílů. FDM tiskárny mají dostupný široký sortiment materiálů a samotné tiskárny se vyznačují svou dostupností. FDM v porovnání s SLA a SLS je nejméně přesnou a designově komplexní metodou. [2]

#### Stereolithography – SLA

Technologie je založena na postupném vytvrzování tekutých polymerů (Resinů) působením záření, nejčastěji UV. Díly vyrobené metodou mají v porovnání s FDM a SLS největší přesnost, detail a hladkost povrchu. Jedná se o metodu nejčastěji využívanou pro produktový design, šperky a detailní prototypování [2].

#### Selective Laser Sintering – SLS

Tato metoda pracuje s vysokovýkonným laserem, který sintruje malé částičky polymerního prášku umístěného v komoře [2]. Jako jediná z těchto tří metod nepotřebuje pro stavbu modelu tvorbu podpor, jelikož podpory přirozeně tvoří nevyužitý prášek v komoře. Metoda se využívá pro méně detailnější, ale zato mechanicky zajímavější díly než metoda SLA a díly vynikají zejména teplotní odolností.

### 2.3 Základní typy materiálů

Na trhu nalezneme velké množství materiálů, které jsou rozmanité ve svých vlastnostech a možnostech použití. Aktuálním materiálovým trendem je kombinace zavedených polymerních materiálů využívaných pro 3D tisk ve spojení se sekaným karbonem. Tato kombinace vytvoří měkký houževnatý základ doplňující se s pevností karbonu. Ovšem v této práci se omezíme na zmíněné zavedené materiály.

## Polylactic acid (PLA)

PLA je jeden z nejpoužívanějších materiálů se širokým spektrem použití, jedná se o biologicky rozložitelný termoplast. PLA je environmentálně přátelský materiál, avšak nedisponuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi [3]. Výhoda PLA materiálu taktéž je, že výsledný povrch součásti je v rámci FDM tisku dobrý a je vhodný pro následné zpracování [4].

## ABS

Je to amorfní plast, který je syntetizovaný polymerací styrenu a akrylonitrilu. Vyznačuje se vyšší pevností a tvrdostí než PLA a taktéž vysokou korozní odolností vůči chemikáliím. Avšak tento materiál je obtížněji tisknutelný a má tendenci k deformaci při tisku. [5] ABS je využíváno na mechanicky namáhané díly, ovšem tento materiál je nahrazován jinými materiály zejména kvůli obtížnému tisku [4].

## PETG

Semi-krytalický Polyethylene Terephthalate PET modifikovaný Glykolem, díky čemuž se jedná o materiál s dobrou houževnatostí a vyšší pevností. Tento materiál dovoluje tisknout výtisky s hladkým povrchem a vynikající rázovou odolností. Taktéž je materiálem, který má nízkou tepelnou roztažnost a téměř nedochází k deformacím v průběhu tisku. Negativem PETG je ovšem jeho náchylnost na vlhkost, kterou pohlcuje. Je taktéž lehčeji tisknutelný ve srovnání s ABS. [5]

## Polykarbonát (PC)

Jedná se o velmi houževnatý a transparentní materiál, který má i dobrou odolnost vůči creepu. Taktéž je velmi dobrý elektrický izolant. Často se PC využívá na mechanické součástky, jako jsou ozubená kola, víčka a elektrické komponenty. [6] PC ovšem velmi absorbuje vlhkost a taktéž se jedná o jeden z obtížněji tisknutelných materiálů [4].

### 2.3.1 Porovnání vlastností

Aby bylo možné vybrat vhodný materiál, jedním z důležitých aspektů při výběru jsou mechanické vlastnosti materiálů. Dalšími aspekty mohou být složitost tisku a náročnost na přípravu tisku.

Tabulka 2-1 Vlastnosti materiálů [5]

vlastnost	PLA	ABS	PETG	PC
Pevnost v tahu (MPa)	28–50	25–65	55	62
Modul pružnosti v tahu (MPa)	2 500	2 000	2100	2 300

Hodnoty v tab.2-1 jsou pouze přibližné, z důvodů mnoha proměnných při 3D tisku, také při tisku součástí dochází k mnoha defektům. Níže uvádím seznam poruch, který zmiňuje článek [7] a uvádí tyto důvody jako nejčastější chyby tisku:

- Zvýšená drsnost povrchu
- Nedostatečné propojení následujících vrstev
- Vady vzniklé špatným nastavením extruze
- Vady vzniklé nastavením výšky tisku
- Podextruze a nadextruze
- Přebytek materiálu při počátku tisku vrstvy
- Deformace způsobené teplotní změnou

## Mechanické vlastnosti

Další konkrétnější vlastnosti, které jsou jsou potřebné pro popsání modelu použitého v simulaci ANSYS-Workbench, jsou popsány v kapitole 4. Avšak popsání vlastností tištěného vzorku není jednoznačné, protože se nejedná o homogenní materiál a zdroje v popsání vlastností se liší. Vlastnosti popsané v tabulce 2-2 jsou data z materiálových listů od různých výrobců a jedná se o data PETG drátu.

**Tabulka 2-2** Vlastnosti PETG z materiálových listů [8]; [9]; [10]

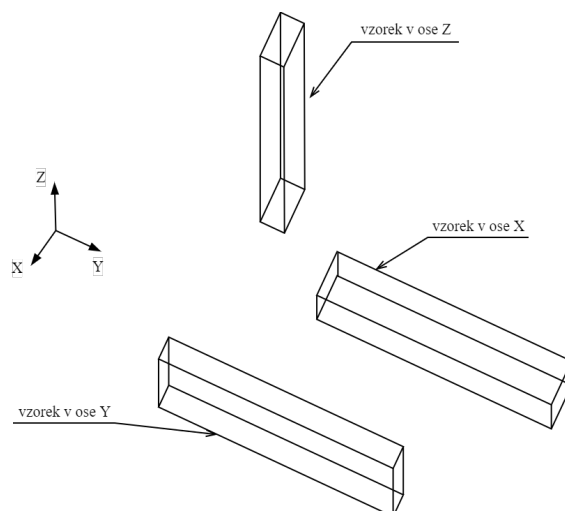
vlastnosti	Zdroj [8]	Zdroj [9]	Zdroj [10]	Průměr
Pevnost v tahu (MPa)	80	28,3–58,6	50	58,8
Youngův modul pružnosti (MPa)	2000–2700	2590	2100	2346,7
Poissonův poměr (–)	0,37–0,44	–	–	0,405
Hustota ( $kg \cdot m^{-3}$ )	1300–1400	1180–1330	1270	1291,7
Tvrдость dle Rockwela (R)	94–101	104–121	109	106,3

Dále budou zmíněny pouze mechanické vlastnosti, zejména Youngův modul, který je hlavním parametrem pro strukturální analýzu na 3D tištěných vzorcích. Avšak studie uvádí významný vliv anizotropie na mechanické vlastnosti způsobené samotnou podstatou FDM tisku. Článek autorů Beth E. Carroll, Todd A. Palmer a Allison M. Beese [11] uvádí, že anizotropní chování je jedním z hlavních problémů aditivní výroby. Vzhledem k povaze FDM tisku po vrstvách je mikrostruktura materiálu uvnitř každé vrstvy jiná než na hranicích mezi vrstvami. Anizotropní chování má za následek odlišné mechanické chování 3D tištěného dílu při vertikálním tahu nebo tlaku ve srovnání s chováním v horizontálním směru. Taktéž v knize [12] autoři uvádí, že přestože se nanášecí linie mohou spojovat se sousedními nanášenými liniemi, vytlačovaný materiál se rychle ochlazuje z teploty tání na teplotu v tiskové komoře, což vede ke vzniku vnitřních napětí, která jsou zodpovědná za slabou vazbu mezi dvěma sousedními nanášenými liniemi. To způsobuje odlupování nebo selhání při výrobě dílu.

Testy, jejichž výsledky jsou uvedeny dále byly zpracovány v článku autorů Rui Almeida, Rainer Börret a Wolfgang Rimkus [13], kteří popisují vytvoření modelu zkušebního vzorku dle standartu ISO 527-2 s použitím pevnostní analýzy v programu ANSYS-Workbench. V rámci tohoto výzkumu bylo zjištěno, že pro 80% výplň materiálu je Youngův modul 1200 MPa. Ovšem při použití simulace v ANSYS-Workbench vyšla hodnota Youngova modulu 1074 MPa. Autor taktéž uvádí že průměrná odchylka mezi měřením a simulací je 9 %. Výzkum [14] měřil Youngův modul pomocí tlakového zatížení a naměřený Youngův modul je 1329,5 MPa, 1117,9 MPa a 1124,0 MPa pro vzorky tisknuté

dle obrázku 2-1 ve směru osy X, Y a Z v následujícím pořadí. Obě práce uvažují chování samotného materiálu jako izotropní v oblasti elastických deformací. Třetí zdroj z práce [15] uvádí naměřenou hodnotu Youngova modulu 478 MPa na vzorcích dle standartu ISO 527-1/2. Hodnoty byly získány v rámci testování vlivu změny teploty extruze na mechanické vlastnosti výtisků. Testy byly provedeny na PET-G vzorku se 100% výplní. Již zmíněný fenomén anizotropie byl zkoumán v práci [16], ve které byly naměřeny hodnoty pro skleněnými vlákny vyztužený PETG na vzorcích dle standartu ISO 527-1/2 a tyto hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 392 MPa do 942 MPa v závislosti na směru tisku.

Článek autorů Soham Teraiya, Swapnil Vyavahare a Shailendra Kumar [17] uvádí hodnoty Youngova modulu naměřené experimentálně na vzorcích podle normy ASTM D638. Vzorky byly tisknuty v rovině xy dle obrázku 2-1, taktéž byla u všech vzorků použita 100% výplň. Tento výzkum se zabýval vlivem parametrů tisku na hodnoty Youngova modulu a pevnosti v tahu. Výzkum zohledňoval vlivy, jimiž jsou: rychlost tisku, rastrovací úhel, rastrovací šířka, tloušťka vrstvy, teplota při tisku. Byly naměřeny hodnoty Youngova modulu mezi 147,05 MPa a 279,68 MPa a pevnost v tahu 31,8 MPa–44,4 MPa v závislosti na kombinaci sledovaných parametrů.

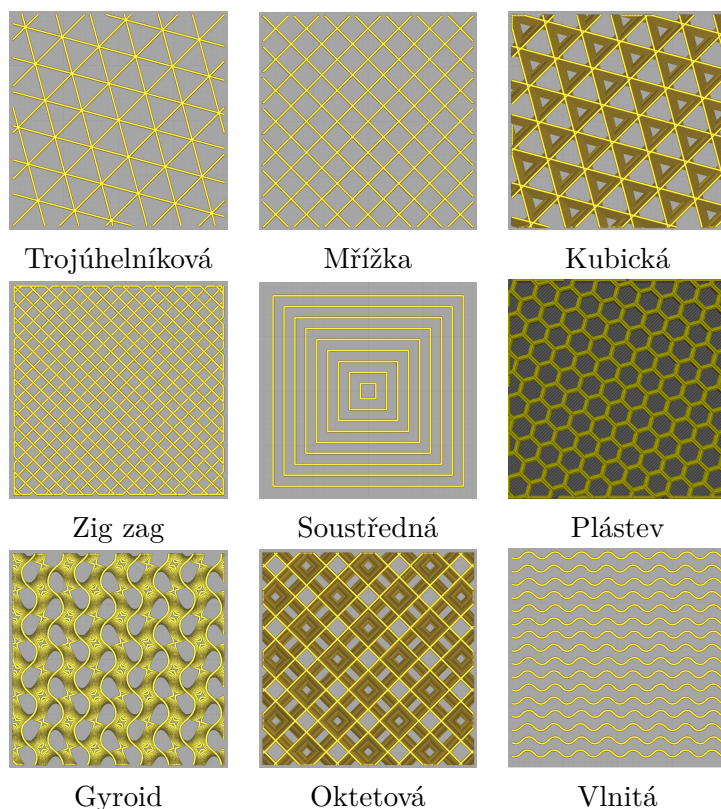


**Obrázek 2-1** Konfigurace vzorků při tisku, upraveno dle [14]

### 2.3.2 Vliv hustoty výplně a vzor výplně

#### Vzor výplně

Dalším parametrem, který je nutno posoudit při návrhu tištěných dílů, je vliv hustoty výplně a její vzor. Srinivan a spol. [18] se zabývali efektem různých procesních parametrů na pevnosti v tahu a drsnosti povrchu u materiálu PETG. Ze studie vyplynulo, že největší vliv na mechanické vlastnosti má tloušťka vrstvy a hustota výplně. Srinivan a spol. [19] se taktéž zabývali vlivem druhu výplně uvedené v obrázku 2-2. Výsledky této práce jsou uvedeny v tabulce 2-3. Je také nutno dodat, že tyto hodnoty jsou naměřeny na vzorku s vrstvou 0,1 mm a s hustotou výplně 80 %. V tabulce 2-3 jsou taktéž uvedeny výsledky výzkumu Adi Pandzic a spol. [20], kteří zkoumali vliv hustoty výplně a taktéž druhu výplně na PLA filamentem tisknutými vzorky.



Obrázek 2-2 Základní druhy výplní

Tabulka 2-3 Pevnosti dle druhu výplně dle [19] a [20]

Druh	Pevnost v tahu PETG (MPa) [19]	Pevnost v tahu PLA (MPa) [20]
Trojúhelníková	18,73	25,12
Mřížka	36,34	26,35
Kubická	31,71	25,85
Plástev	34,26	22,82
Soustředná	13,54	35,72
Zig zag	33,35	20,98
Gyroid	–	27,77
Oktetová	25,28	26,47
Vlnitá	24,46	25,03

### Hustota výplně

Vliv hustoty výplně publikovali ve své práci K. Sathish a spol. [21]. Tuto problematiku zkoumali na vzorcích, které byly připraveny dle norem: ASTM E18 pro měření tvrdosti dle Rockwella, ASTM D638 pro tahovou zkoušku a ASTM E399 rázovou houževnatost na Charpyho kladivu. Výsledek této práce je uveden v tabulce 2-4.

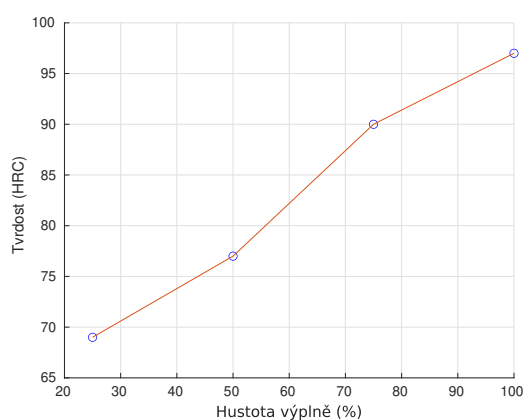
Taktéž z výzkumu Algarni M., Ghazal S. [22], kde byly zkoumány změny parametrů tisku s jejich vlivem na mechanické vlastnosti. Zmíněnými parametry byla hustota výplně, tisková rychlost, úhel tisku a tloušťka tiskové vrstvy. Změny těchto parametrů byly zkoumány na materiálech PLA, ABS, PEEK a PETG. Jedním z výsledků této práce je, že největší vliv na mechanické vlastnosti má právě hustota výplně. Například u materiálu



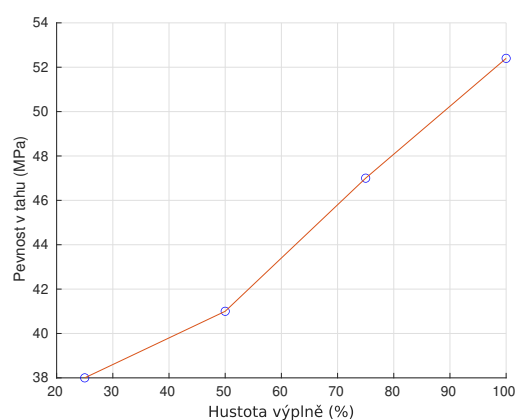
PETG má až 76% podíl na změnu Youngova modulu. Naopak u ohybové pevnosti má vliv jen 2%, a tedy největší vliv má zde rychlost tisku a to 53 %.

**Tabulka 2-4** Vlastnosti se změnou hustoty výplně [21]

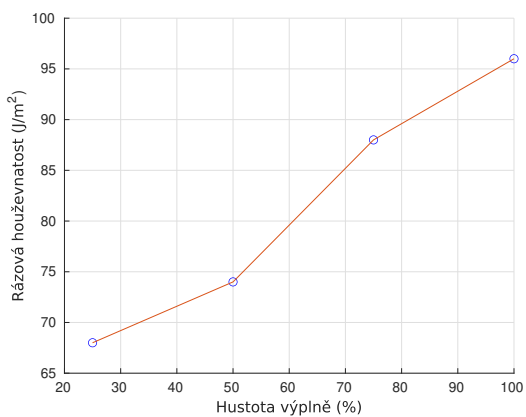
Hustota výplně	25%	50%	75%	100%
Tvrdość (HRC)	69	77	90	97
Pevnosť v tahu (MPa)	38	41	47	52,4
Rázová houževnatost ( $J \cdot m^{-2}$ )	68	74	88	96
Pevnosť v ohybu (MPa)	51	59	65	70



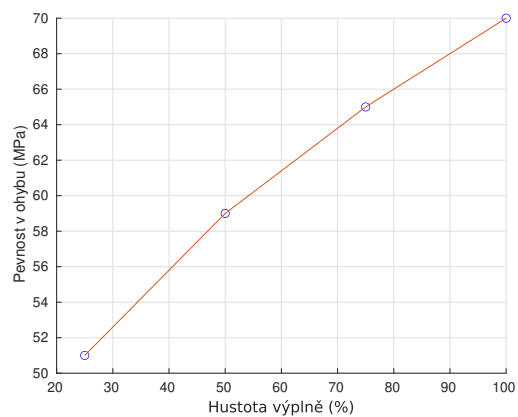
Tvrdość



Pevnosť v tahu



Rázová houževnatost



Pevnosť v ohybu

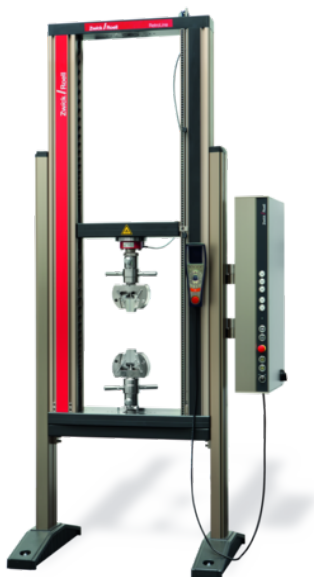
**Obrázek 2-3** Znázornění vlivu hustoty výplně viz tabulka 2-4

## 2.4 Přístroje

Dále v této podkapitole jsou uvedeny přístroje, které byly použity při testech FDM tištěného materiálu uvedených v podkapitole 4.1. Také zde byly uvedeny přístroje, které jsou použity při montáži modulu a následně v kapitole 5 při testování funkčnosti konstrukčního řešení přípravků.

### ZwickRoell Z020

ZwickRoell 2-4 je určený k tahovým, tlakovým, ohybovým a stříhovým zkouškám. Výsledky jsou vykresleny do zátěžového diagramu jakožto zátěžová křivka a umožňují tak určit důležité body jednotlivých zkoušek. Těmito body mohou být body konce elastických deformací a začátek plastických deformací. [23]



Obrázek 2-4 ZwickRoell Z020 [23]

### 3D tiskárny

Ve firmě Schaeffler byly dostupné dva typy tiskáren: Rise3D Pro2 a Original Prusa i3 MK3S. Průmyslová tiskárna Rise3D dle stránek výrobce [24] disponuje tiskovou plochou 305×305×300 mm s možností duální extruze a maximální teplotou tisku až do 300°C. Součástí této tiskárny je také kryt, který udržuje konstantní klima na tiskové ploše, a také disponuje mechanismem na sušení filamentu. Druhá tiskárna MK3S ze stránek výrobce [25] disponuje tiskovou plochou 250×210×210 mm. Umožňuje nastavit teplotu v tiskovém prostoru a teplotu trysky až na 300 °C. Obě tiskárny jsou konfigurovány automatickým polohováním, snímačem filamentu a již v základu integrovaným obnovením tisku při ztrátě elektrické energie.

## Montážní přístroje

### Elektrický šroubovák DS 34-MDW

Ze stránek výrobce DSM Messtechnik [26], který uvádí základní vlastnosti o šroubováku s elektronicky řízeným motorem a digitálním přenosem a měřením dat. Šroubovák umí vyvinout točivý moment od 2,5 Nm do 15 Nm. Měření úhlu probíhá za pomoci digitálního absolutního enkodéru a přesnost měření úhlu natočení:  $0,1^\circ$ . Tento šroubovák je připojen do montážní linky a odesílá data utahování šroubů na modulech.

### Lis Gechter 8/16 HKPV

Jedná se o ruční průmyslový lis s maximální lisovací silou 32 kN. Lis je rozšířený o dvě měřicí zařízení a to senzor vyvinuté síly Kistler 9101A schopný měřit kvazistatické a dynamické síly od 0 do 20 kN při vhodných podmínkách s přesností  $\pm 0,1\%$  [27]. Druhým příslušenstvím je potenciometrický snímač posunutí lisovacího trnu od výrobce Burster pro přímé měření do 50 mm s  $\pm 0,1\%$  nelinearitou [28].

## 2.5 Termoregulační modul

Termoregulační moduly (z angl. thermal management module: TMM) jsou elektronicky řízené termostaty s elektromechanicky řízenými rotačními ventily, které regulují tok chladiva tekoucího v okolí spalovacího motoru vozidla [29]. Rozvojem elektromobility se TMM dle článku [30] využívá i u hybridních a elektrických vozidel, kde má pozitivní vliv na dojezd vozidla. Topný systém zejména v zimních obdobích spotřebuje podobné množství energie, jako je potřeba na pohon vozidla, a proto jeho efektivnější využití má pozitivní vliv na spotřebovanou energii a dojezd vozidla.

Klasické termostaty na voskové bázi s tepelným senzorem jsou přímým předchůdcem TMM [31]. Stále se v některých konstrukcích a to zejména v místech s omezeným konstrukčním prostorem tyto klasické termostaty využívají [31]. Jsou ovšem na ústupu, to zejména kvůli opožděné reakci na změnu přívodu energie do chladicího systému, taktéž trpí na tlakové ztráty v systému [31]. Toto řešení je nahrazováno aktuátory poháněnými ventily, jimiž mohou být rotační ventil uvedený v kapitole 2.5 patentovaný společností Schaeffler, ale také jiná řešení pomocí kulových a části kulových ventilů. Ovšem všechna tato rozdílná konstrukční řešení se ve výsledku shodují v jejich funkci.

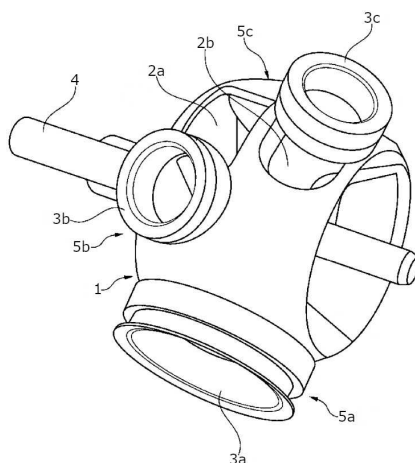
Dle článku společnosti Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG [32] byl na vývoj TMM zaměřen pohled v rámci zvyšování nároků na snižování emisí a spotřeby paliva osobních automobilů. TMM taktéž zajišťuje a reguluje chod klimatizace. TMM umožňující prediktivní řízení chladicího oběhu, umožňující efektivnější využití integrovaného turbodmychadla v osobním vozidle. TMM umožňuje řídit chladicí proces na základě zatížení a otáček motoru. Při potřebě rychlého ohřevu motoru lze zcela odstavit oběh kapaliny. Řídící jednotka používá výpočty založené na zatížení, umožňuje na TMM napojit mnoho tepelně regulovatelných komponentů.



**Obrázek 2-5** Termoregulační modul [30]

## Rotační ventil

Jako jeden z hlavních komponentů modulu má společnost Schaeffler patentovanou vlastní technologii rotačního šoupátkového ventilu. Dle patentu [33] se vynález týká chladicího systému spalovacího motoru, který má nejméně dva okruhy chladicí kapaliny pro řízení průtoku chladicí kapaliny. Obsahuje termoregulační modul, který se skládá z pouzdra otočného šoupátka, které obsahuje otvory, jimiž může proudit chladicí kapalina. Do pouzdra je vloženo otočné šoupátko 2-6 otočné kolem osy otáčení (4), přičemž toto otočné šoupátko spolupracuje s vývody (3a-3c) a je nastavitelné pomocí ovládacího pohonu. Rotační šoupátko (1), které má podobu duté koule, má nejméně dvě ovládací dráhy (2a-2b), které jsou vůči sobě posunuté a které jsou spojeny s radiálně orientovanými vývody (3a-3c). K utěsnění prstencové mezery mezi rotačním šoupátkem (1) a tělesem rotačního šoupátka jsou použity těsnící kroužky (5a-5c).

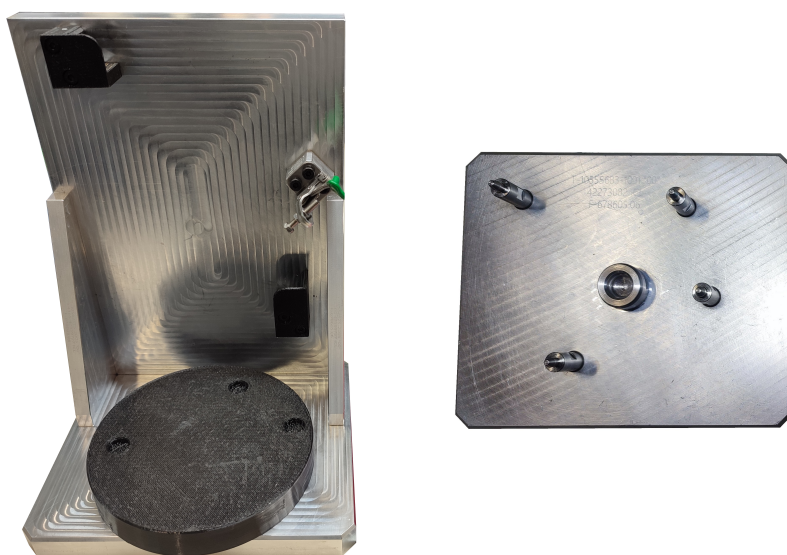


**Obrázek 2-6** Šoupátkový ventil [33]

## Přípravky využité pro montáž

Většina komponent tohoto modulu se vyrábí pomocí vstřikování plastů a v případě prototypů zde najdeme i díly obráběné. Modul se skládá z mnoha komponent, které je nutné bezpečně složit dohromady, k tomu účelu slouží přípravky používané v montážní lince. Aktuálně používané přípravky jsou na obrázku 2-7. Jedná se pouze o dva přípravky z několika, které jsou potřeba k montáži modulu, ovšem tyto konkrétní dva poslouží pro ověření vhodnosti využitelnosti 3D tisku. Na obrázku 2-7 si můžeme všimnout, že zde již 3D tisk byl využit. Jednalo se ovšem o použití bez širších předchozích znalostí. Neboli byla použita 100% výplň tisku. Taktéž modely tištěných dílů stávajících přípravků vychází zcela z původní konstrukce dílů pro kovovýrobu.

Odhadované náklady [34] na přípravek pro operaci šroubování jsou cca 38 000 Kč a na přípravek pro operaci lisování jsou cca 22 000 Kč. Celková doba výroby<sup>1</sup> obou přípravků byla ze zkušeností zaměstnance stanovena na 1 měsíc.



Obrázek 2-7 Přípravek využitý pro operaci šroubování a přípravek využitý pro operaci lisování

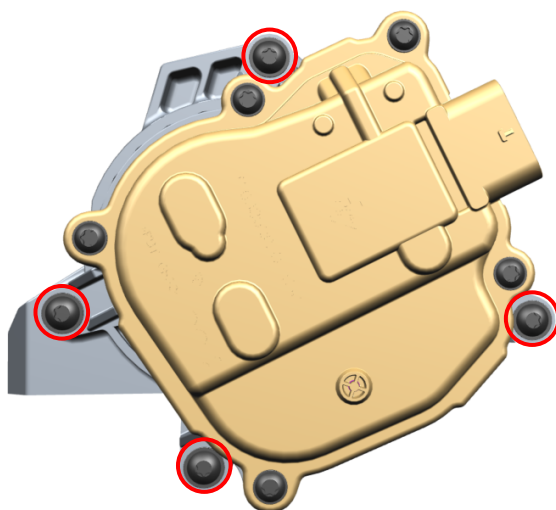
## 2.6 Operace prováděné na přípravcích

### 2.6.1 Šroubování

Na obrázku 2-8 můžeme vidět červeně vyznačené čtyři šrouby, které jsou dotahovány pomocí elektrického šroubováku. Modul má být během utahování upevněn v navrhovaném přípravku. Jedná se o čtyři samořezné šrouby do termoplastů s půlkulatou hlavou KN6038 5x15 - T25. Při využití těchto šroubů, není třeba vytvoření závitů v modulu a šroub se prořezává předlisovaným otvorem. Zatížení přípravku při šroubování vzniká vlivem řezání závitu do předlisované díry v modulu a následným dotáhnutím spoje na požadovaný utahovací moment.

<sup>1</sup>Doba od objednání až po jejich dodání.

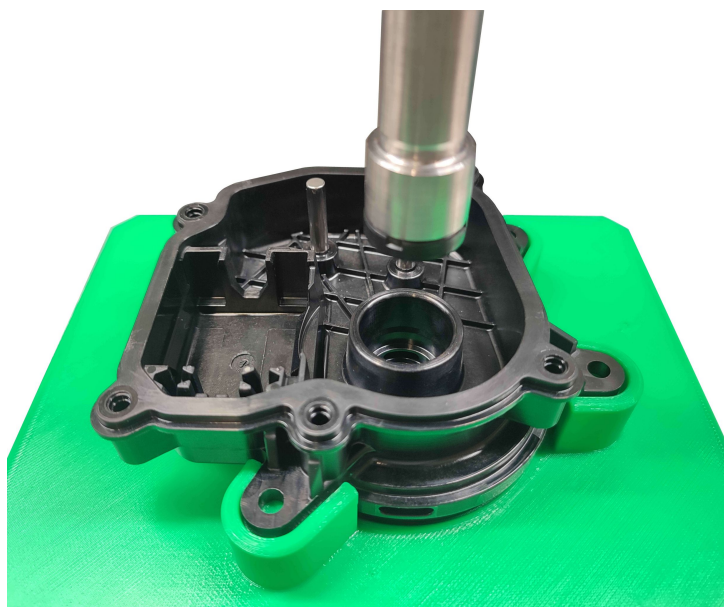
- T25



**Obrázek 2-8** Proces šroubování s vyznačením utahovaných šroubů

## 2.6.2 Lisování

Lisování se provádí na komponentě 2-9, sloužící k uchycení řídicí<sup>2</sup> části modulu. Do tohoto místa se lisuje těsnění, které brání vniku chladicí kapaliny, z oběhu do řídicí části. V rámci lisování je důležité dodržet předepsanou sílu na zalisování. Ta je kontrolována pomocí senzorického měření na lisu.



**Obrázek 2-9** Proces lisování

<sup>2</sup>Místo pro uložení aktuátoru, ozubeného soukolí a elektronického obvodu.

## 2.7 Druhy upínacích mechanismů

Pro pevné upínání v přípravcích je nutné využít různých prvků, které omezí pohyb upínaných součástí na minimální možný. Těchto prvků nalezneme mnoho a jedná se jak o mechanismy, tak o jednoduché typy spojů s širokým spektrem využití.

### Kloubová upínka

Jedná se o mechanismus, díky kterému dokážeme vyvodit poměrně velkou upínací sílu, ovšem k uzamčení působení této síly stačí aplikovat pouze malou sílu. Upínka se obvykle skládá ze dvou článků a tří kloubů. Hlavním principem tohoto mechanismu je, že síla je aplikována stále v kolmém směru na upínací sílu a díky tomu nám stačí aplikovat malou sílu na uzamknutí mechanismu [35]. Uzamknutí mechanismu spočívá v tom, že dva nepohyblivé klouby tvoří pomyslnou osu, pokud pohyblivý kloub překročí tuto osu, mechanismus se uzamkne [35]. Toto uzamknutí je spjata s tím, že upnutá součást nyní působí na upínku ve směru, ve kterém byla upínka uzamknuta, a tedy teoreticky nikdy nedojde k samovolnému odemčení. Odemknout tuto upínku, jde pokud na páku aplikují opačný směr síly než ten, při kterém byla uzamčena.

### Plochá upínka

Nastavitelná plochá upínka se stavěcím šroubem je typ upínky, která bývá použita pro přesné a pevné upevnění na pracovní plochy. Tyto upínky mají upínací mechanismus založený na principu páky, který uživatelům umožní snadno a rychle měnit upínací sílu. Obvykle se skládají z lehkých či pevných materiálů, jako je hliník nebo ocel. Seřizovací šroub těchto upínek, který umožňuje uživateli přesně upravit jejich délku a zafixovat je v požadované poloze, je důležitou součástí konstrukce. Taktéž je důležité upevnění upínky k přípravku pomocí jiného šroubu či podpůrné konstrukce. Nevýhodou je, že v některých případech se může jednat o zdlouhavější způsob upínání.

### Drážky a snap fit spoje

Na přípravku se vytvoří drážka, do které je možné zasunutí požadovaného výstupku na modulu, v určité svislé poloze se výstupek ustaví o konec této drážky. Pro méně pevné ustavení modulu do přípravku musí tato drážka být vytisknuta s malou vůlí. Ovšem tato vůle mezi spojem a dílem způsobí, že není modul bezpečně upnut k přípravku a může dojít k nepřesnému provedení operace. Dalšími druhy spojů jsou snap fit spoje, některé z druhů snap fit spojů jsou sférický, kruhový a snap fit spoj s hákem. Snap fit spoje se taktéž liší tuhostí a nutností správně vyřešit tolerance, taktéž u některých druhů materiálů, zejména PLA, zde může docházet k únavovému lomu při opětovném rozebírání spojení [36]. Jelikož snap fit spojení využívá ohybu tenké stěny materiálu, je nutno při konstrukci spojení dbát na směr tisku, abychom následně při zatížení spojení nepůsobili smykovým napětím na rozhraní vrstev tohoto spoje.

### Tvarové vedení

Jednou z výhod 3D tisku je možnost vytvoření téměř libovolného tvaru. Tuto výhodu můžeme zejména využít v ustavení modulu v přípravku na ložní ploše. Hlavní výhodou

je, že nyní si mohu modul otočit do libovolné pozice, ve které je potřeba provést montážní operaci. K této pozici mu vždy bude možné vytvořit objemový negativ v přípravku. Jedná se i o jednu z hlavních výhod 3D tisku ve vztahu k této konkrétní aplikaci.

## Podpory

Lze taktéž vystavět téměř libovolnou podporu, a tedy i podpořit modul v libovolném místě. Podpora může mít různorodé tvary, ovšem je nutno si dát pozor, aby podpora nekolidovala se zbytkem modulu. Může dojít k obtížím s tiskem těchto podpor a nutnosti využití podpor pro tisk, aby nedošlo ke zhroucení tisknuté podpory.



Obrázek 2-10 Upínací mechanismy [37], [38], [39]

## 2.8 Spojení 3D tištěných komponent

Toto řešení bychom mohli rozdělit na dvě skupiny, neboli přípravky složené z několika dílů a jednodílné přípravky. Pokud by byl uvažován přípravek složený z několika částí, musíme uvažovat způsob, jakým přípravky budou spojeny do jednoho celku.

### Tvarové spoje

Jedná se o spojení za pomoci tvarových prvků, jako jsou tvarové drážky, tvarové klipy a další. Tyto prvky mohou poskytnout relativně rychlou montáž a demontáž prvků přípravku, kterou lze využít při konstrukci. Nevýhodou může být, že u některých klipů může při demontáži dojít k poškození a následující nefunkčnosti spoje.

### Šroubové spoje

Šroubové spoje jsou základním druhem pro spojování strojních součástí a přichází tedy v úvahu i využití u tištěných dílů. Při vytvoření závitu přímo v součásti hrozí opotřebení závitu, a tedy i nemožnost opětovného smontování. Z tohoto důvodu využíváme spojení pomocí kovových součástí. V tištěných součástech využíváme pojištění a fixaci matice s využitím zapuštění matice do součásti, které může být provedeno připraveným zahloubením, nebo připravenou dutinou v součásti s využitím pauzy tisku a vložením matice do dutiny a následným zatisknutím této matice v součásti. Druhou možností je využití závitové vložky, kterou lze pomocí tepelného působení zatavit vložku do součásti.



## Nerozebiratelné spojení

Jedním z hlavních nerozebiratelných spojení, využívaných pro spojování 3D tištěných dílů, jsou různé druhy lepidel. Výběrem a testováním adhezivních druhů lepidel se zabýval výzkum [40]. Výsledkem tohoto výzkumu bylo, že nejlepší parametry při spojování 3D tištěných dílů je lepidlo Loctite 401. Již zmíněný výzkum se taktéž zabýval pevností lepených zámků při spojení součástí. Výsledkem těchto testů bylo spojení při použití T-drážky.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Z provedené rešerše vyplývá, že nejvhodnější materiál pro konstrukci navrhovaného přípravku je PETG. Důvodem je kombinace dobré zpracovatelnosti a dobrých mechanických vlastností. PETG je například ve srovnání s ABS snadněji tisknutelné. Je tu tedy nižší šance na vyrobení vadného kusu při tisku, jehož doba může snadno dosáhnout i desítek hodin. Další rozhodující vlastností je jeho houževnatost s relativně vysokou pevností, které kladně přispívají k celkové životnosti výtisků. Tedy můžeme říct, že PLA by nebylo příliš vhodné pro toto použití a to zejména kvůli jeho křehkosti.

Také bylo nutné zvolit co možná nejvhodnější parametry tisku, abychom dosáhli pro danou operaci vyvážené varianty dílů. Prvním z parametrů je vzor výplně a jedny z vhodných druhů jsou mřížka, gyroid a plástev. Pro větší pokrytí, respektive propojení jednotlivých vrstev byl zvolen v této práci gyroid. Dalším voleným parametrem byla hustota výplně, kterou je vhodné měnit na základě druhu namáhání přípravku. Pro přípravek méně namáhaný, kterým může být například přípravek pro operaci šroubování, lze využít procentuální výplň v rozmezí 40 % až 70 %. Pro přípravky namáhané více lze využít výplň 60 % až 99 %. V případě 100 % výplně se nejedná o tisk s výplní, ale o plný tisk pod zvoleným úhlem trajektorií tisku. Další parametry nastavení tiskárny jsou teplota extruze 250 °C, teplota tiskové podložky 80 °C.

Protože se mechanické vlastnosti PETG z různých článků výrazně rozcházejí, bude proveden experiment pro konkrétní použití a konkrétní materiál. Výsledky tohoto experimentu budou využity jako vstupní parametry pro referenční model v softwaru Ansys-Workbench. Tento model poslouží jako možnost pro analýzu chování konstruovaných přípravků. U prvků používaných ke spojení, jak samotného přípravku, tak přípravku s montovanou součástí, bylo zapotřebí posoudit parametry, jimiž jsou například rychlosti upínání, tuhost upnutí, dispoziční možnosti, rozebíratelnost spoje a následné složitosti implementace prvku do soustavy. Jako nejlepší se z hlediska rychlosti upínání jeví jednoduché prvky, jako jsou podpory a drážky. Naopak nejlepší z hlediska tuhosti upnutí, jsou oba druhy upínek. U kloubové upínky se jedná i o relativně rychlé upnutí. Vhodnou kombinací z hlediska montáže je využití, co nejvíce prvků pro rychlé upnutí v kombinaci s prvkem pro zajištění tuhosti upnutí.

### 3.2 Cíl práce

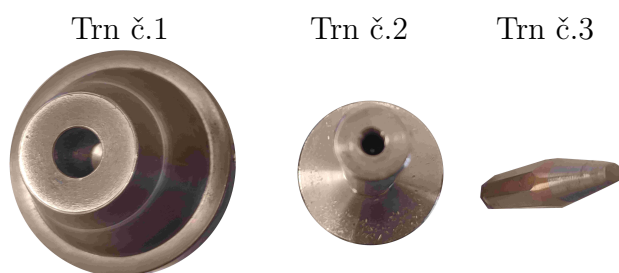
Hlavním cílem této práce bylo stanovit vhodnost využití 3D tisku plastu u prototypové montáže. Posoudit vhodný materiál na základě rešerše a pevnostních charakteristik, ze které poslouží k navržení a vyrobení dvou přípravků pro montážní operace lisování a šroubování. Přípravky byly vyrobeny pomocí FDM metody 3D tisku. Dílčím cílem bylo otestovat přípravky při reálné montáži součástí modulu. Naměřené parametry z montáže na FDM tištěných přípravků porovnat s naměřenými parametry u montáže původních kovových přípravků. Při porovnání přípravků byl také zohledněn čas a náklady na výrobu. Vedlejším cílem této práce bylo analyzovat chování 3D tištěných součástí při tlakovém zatížení a porovnat chování s modelem vytvořeným v softwaru Ansys-Workbench. Následně tento model aplikovat na přípravek k lisování.

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 4.1 Experimentální ověření deformace PETG

Test byl proveden z důvodu potřeby analyzovat chování materiálu na 3D tištěných dílech a získání závislosti posunutí na zatížení. Výsledky budou následně využity pro nastavení vlastnosti materiálu při výpočtech pomocí metody konečných prvků v kapitole 4.2. Při reálném lisování na komponentách je nutné, aby nedocházelo k příliš vysokým deformacím, protože by mohlo dojít k zanesení chyby při měření síly a způsobení nestabilit měření. Deformace je nutné zohlednit při konstrukci přípravků a zvolit dostatečně velké opěrné plochy. Také byl tento test prováděn i z důvodu vymezení použitelnosti tištěných přípravků pro lisovací operace.

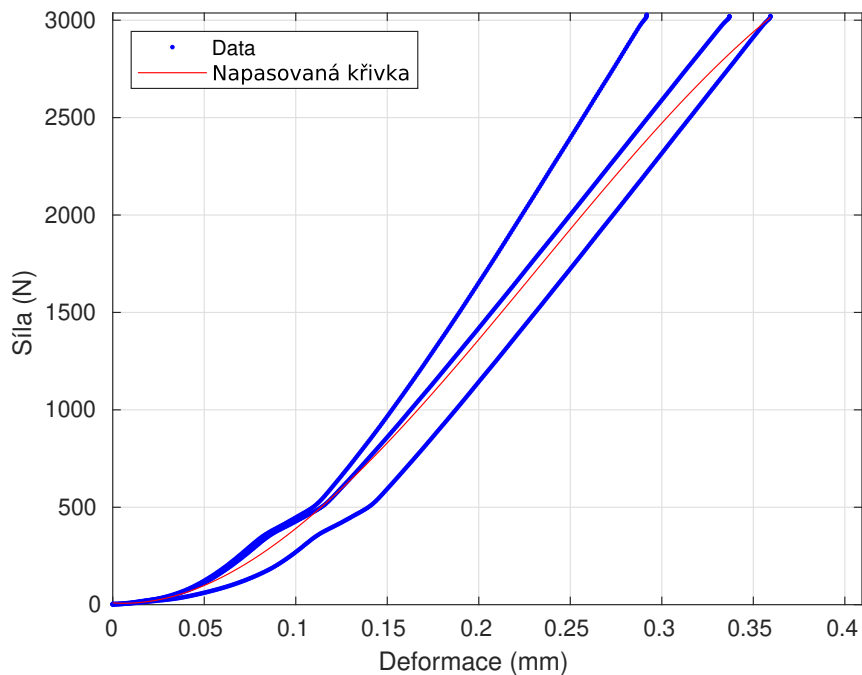
Test byl proveden na zkušebním zařízení Zwick Z020 za použití 3 přípravků neboli trnů vyobrazených v obrázku 4-1, simulujících opěrnou plochu, bylo použito čtyř 3D tištěných destiček tištěných se 100% výplní. Na těchto destičkách byly provedeny vždy 3 sady měření pro každý trn. Destičky byly vyrobeny z materiálu PETG, který byl následně využit pro tisk testovaných přípravků, a obě destičky disponovaly rozměry 100 mm x 100 mm a jejich výška byla 8 mm a 15 mm. Tyto dvě výšky byly voleny na základě dosavadních přípravků a rozměrů, které u nich byly nejčastěji použity. Trn č. 3 disponoval rozměrem o průměru 4 mm. U trnu č. 2 se jednalo o mezikruží o vnějším průměru 15 mm a vnitřním průměru 5 mm a největší trn č. 1 s vnějším průměrem 35 mm a vnitřním průměrem 14 mm, viz obrázek 4-1.



Obrázek 4-1 Přípravky použité k tlakovým testům

#### 4.1.1 Průběh měření

Měření byla třikrát opakována pro jedno zatížení a stejný trn. Měření probíhalo vždy v dostatečné vzdálenosti od bočních vrstev a v neporušeném místě desky od předchozího měření. Trn č. 1 s byl zatlačován do destičky s postupně vzrůstající silou (100 N, 150 N, 250 N, 500 N, 1000 N, 2000 N), stejné měření bylo následně provedeno na druhé desce s větší tloušťkou. Hodnoty sil byly voleny na základě lisovací síly aplikované při montáži. Lisovací síly u přípravků mají dosáhnout maximálních hodnot 1300 N. Hodnota 2000 N byla zvolena z důvodu bezpečnosti, aby bylo analyzováno chování i v takto přetížených hodnotách. U trnu č. 2 jsem použil stejné hodnoty sil, jelikož do síly 2000 N nenastala v destičce žádná měřitelná trvalá deformace, hodnoty byly zvýšeny (až na 3000 N, 5000 N, 10000 N), kde již byly trvalé deformace naměřeny. Takto vyšší hodnota byla zvolena pro



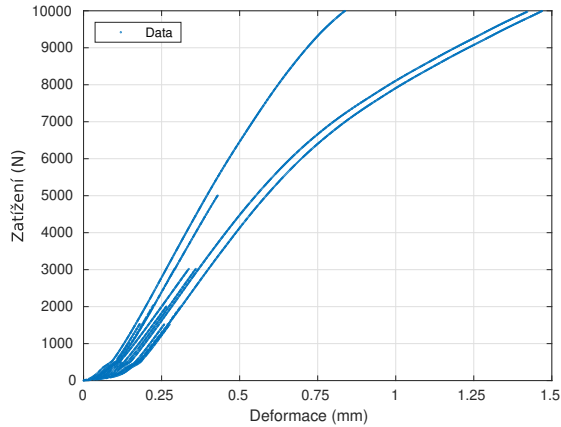
**Obrázek 4-2** Data naměřená na desce o tloušťce 8 mm s trnem č. 2

přesnější chování materiálu i při velice nadměrném zatížení. U trnu č. 3 bylo měření prováděno pro síly 1500 N, 2000 N, 10000 N. Nenastaly však žádné trvalé deformace a měřit vyšší hodnoty nemělo pro náš účel smysl. Ovšem jak již bylo zmíněno, tak i naměřené elastické deformace a vlastnosti podpůrné plochy mají pro zalisování význam.

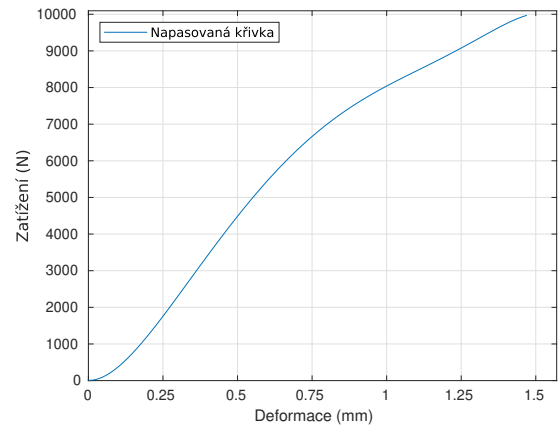
#### 4.1.2 Výsledky měření

Porovnáním výsledků posunutí vyplynulo, že deska o tloušťce 15 mm má větší objem materiálu, který pohltí energii elastickými deformacemi z působící síly lépe než deska o šířce 8 mm. Tudíž trvalá plastická deformace nedosáhne hodnot jako u desky s menší šířkou a zatěžovací dráha je tedy delší. Z křivek průběhu síly a posunutí také vyplývá, že bylo zapotřebí využít na stejnou deformaci větší dráhy. Ovšem tento jev neplatí u trnu s  $\varnothing$  4 mm, kdy tyto průběhy jsou velice podobné. Dokonce u tohoto průběhu je deformace větší na destičce o tloušťce 8 mm. Je to dáno velikostí tohoto trnu, který působí pouze na malé ploše, jež obsahuje pouze 10 linií ve vrstvě tisku, a tyto výsledky mohou být velice zkresleny lokálními vadami tisku.

Tyto průběhy jsou znázorněny v grafu 4-2, kde jsou vidět průběhy pro jednotlivá měření a následná červeně vykreslená průměrná hodnota. Všechna data byla zakreslena pro danou šířku destičky a pro určitý hrot. Tyto výsledky pro porovnání velikosti desek jsou zobrazeny v grafu obrázku 4-3. Další grafy pro porovnání průběhů v závislosti na tloušťce desky pro trn č.1 a pro průběh u desky 8 mm pro trn č.3 jsou uvedeny v příloze A.

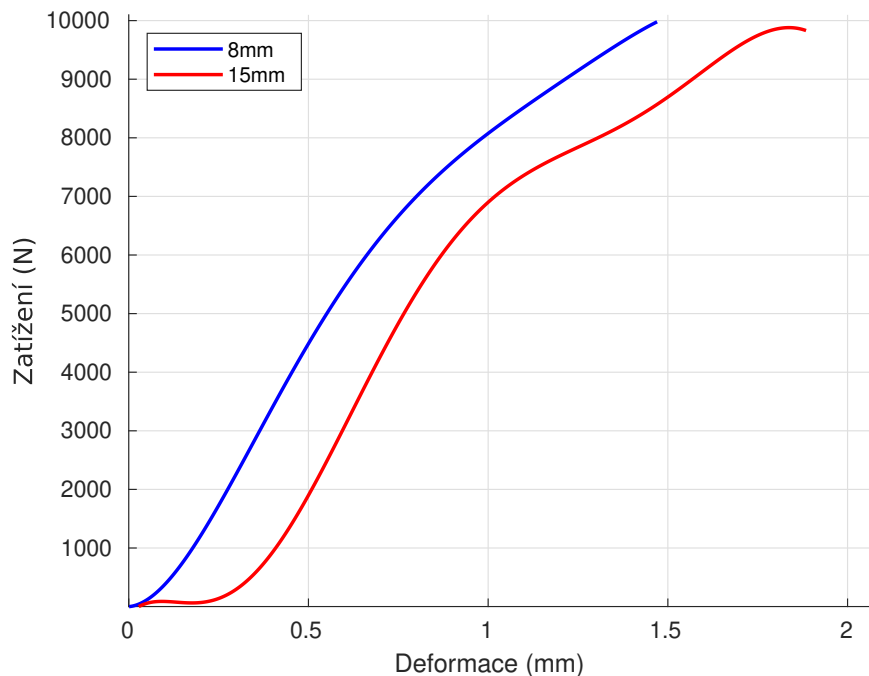


Všechny zátěžové síly na desku v datech



Proložená křivka daty

**Obrázek 4-3** Vykreslení všech měření pro trn č. 2 a tloušťku desky 8 mm



**Obrázek 4-4** Porovnání deformace pro trn č.2 v závislosti na tloušťce desky

### Výpočet Youngova modulu z měření

Výpočet byl proveden v lineární části grafu pro hodnoty  $\delta = 0,51 \text{ mm}$ ,  $F = 2000 \text{ N}$  a trn č. 2 s obsahem působící plochy  $S = 157,08 \text{ mm}^2$ , které byly dosazeny do níže uvedených rovnic (4.1), (4.2), (4.3).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (4.1)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (4.2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

Jedná se o základní výpočet na základě Hookova zákona, kde  $\varepsilon$  je prodloužení (-),  $\delta$  deformace (mm),  $L$  je tloušťka desky (mm) a  $E$  je Youngův modul (MPa). Po dosazení do těchto rovnic nám vyjde Youngův modul roven 374,5 MPa.

## 4.2 Predikce deformací pomocí metody konečných prvků

Analýza vychází z podkapitoly 4.1, a tedy nastavení modelu dle naměřených dat. Tato analýza byla provedena pro možnost následné predikce chování přípravku a pro schopnost nastavit co možná nejpřesnější materiálový model, který bude co možná nejlépe odpovídat reálnému chování. Analýza byla provedena metodou konečných prvků v softwaru Ansys-Workbench.

Výchozí data pro nastavení materiálu PETG vychází z kapitoly 3, data byla následně použita pro model desky, která byla zatížena ekvivalentním silovým zatížením k naměřenému zatížení v podkapitole 4.1. V první fázi byly porovnány výsledky měření na modelu desky, která byla vymodelována dvěma způsoby. První model byl vytvořen jako 1/4 objemu desky a u druhého modelu se jednalo o axisymetrický model. Toto porovnání bylo provedeno z důvodu verifikace nastavení okrajových podmínek a možnosti využití velmi jemné sítě u axisymetrického modelu. Díky jemné síti se i výsledek simulace zpřesňuje a díky plošnému modelu se nejedná o zdoluhavý výpočet. Podmínkou použití axisymetrického modelu je, že zatížení, okrajové podmínky a model musí být rotačně symetrické, což model destiček splňuje. Axisymetrický model byl vymodelován jako plocha v rovině x-y s osou rotace y. Horní hrana byla rozdělena na dvě nebo tři části vždy hlavním rozměrem o velikosti trnu. Na tuto hranu bylo umístěno dané zatížení dle výsledku z testů 4.1. Na spodní hranu byla umístěna okrajová podmínka displacement se zamezenými posuvy v ose y. Sledovaným parametrem v obou případech bylo posunutí vyvolané silovým působením na plochu modelu a výsledné porovnání hodnot se nachází v tabulce 4-1.

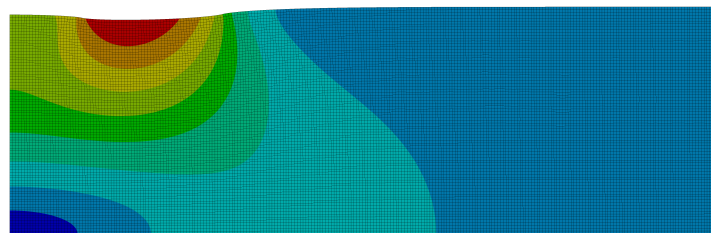
Objemový model 1/4 desky byl následně rozšířen pomocí podmínky symetrie. Využity byly dvě symetrie podle osy y a osy x. Další použité okrajové podmínky byly displacement se zamezeným nulovým posuvem na spodní ploše modelu, reprezentující podložku, na které byla deska během testu položena. Trn nám v tomto modelu reprezentuje kruhová a mezikruhová plocha na horní ploše destiček, která je silově zatížena.

**Tabulka 4-1** Deformace pro trn č. 2 při zatížení 5000N

Šířka desky (mm)	Deformace z měření (mm)	Deformace z Ansys-Workbench (mm)
8	0,55	0,46
15	0,76	0,64

B: 15 mm - 5 mm axi  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1 s

0,463 Max  
0,4116  
0,3601  
0,3087  
0,2572  
0,2058  
0,1543  
0,1029  
0,05144  
1,194e-8 Min



Obrázek 4-5 Model MKP využívající axisymetrii

## 4.3 Konceptní návrhy

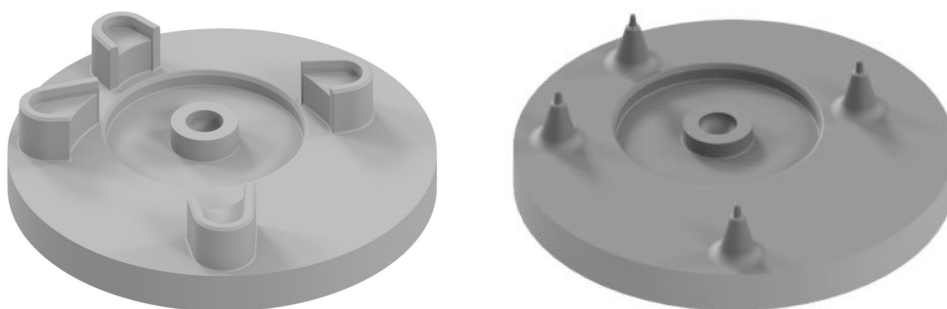
### 4.3.1 Přípravek pro operaci lisování

#### Koncept 1

Koncept je na obrázku 4-6. Disponuje plochou, která podepírá vkládanou součást v místě lisování. Plocha je vysunuta z kruhového vybrání, sloužící jako odlehčení přípravku. Dále byly přidány čtyři podpory, pro adekvátní výstupky na vkládané součásti. Vnitřní plochy těchto podpor byly koncipovány s vůlí vůči vkládanému dílu. Vnitřní hrany byly zkoseny a zaobleny, pro snadnější vkládání dílu do přípravku.

#### Koncept 2

Jedná se o koncept v pravé části obrázku 4-6, vycházející z původního návrhu kovového přípravku, a je modifikován stejným způsobem, jako je uvedeno v konceptu 1. Touto modifikací je myšleno kruhové vybrání a následná vysunutá podpurná plocha. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma koncepty je způsob, jakým se díl vkládá do přípravku. Tento koncept využívá menší množství materiálu, ale horší usazení součásti do přípravku, jelikož na výčnělky přípravku dosedají malé otvory součásti. Průměry výčnělků musí být navrženy s vůlí vůči otvoru, aby nedošlo k silovému kontaktu při lisování. Jejich funkce by měla být vodící, abychom správně součást v přípravku ustavili a součást se při lisování nezvrátila. Ovšem značnou nevýhodou těchto výčnělků je jejich pevnost a tedy vysoká šance na jejich ulomení.



Obrázek 4-6 Koncept 1 vlevo a koncept 2 vpravo

### 4.3.2 Přípravek pro operaci šroubování

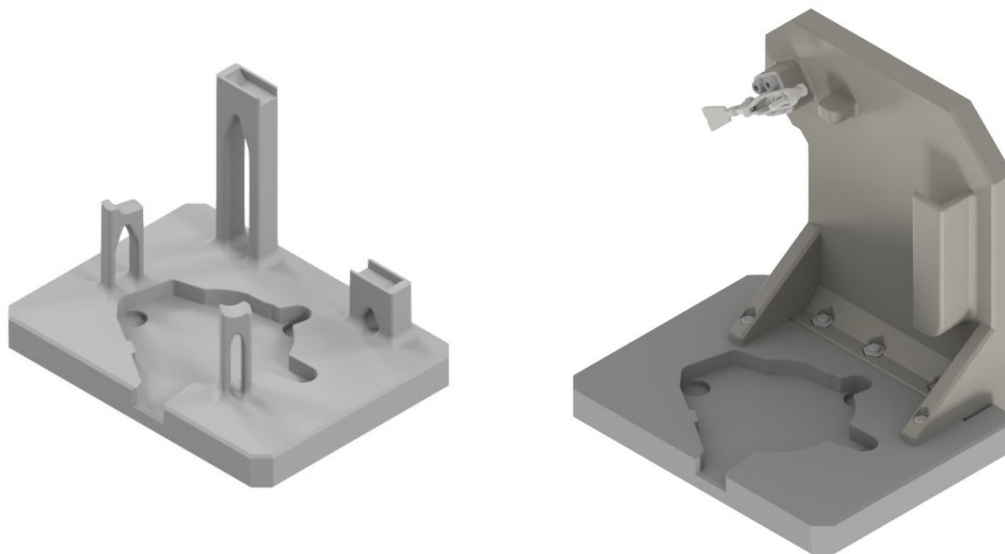
#### Koncept 1

Geometrie konceptu na obrázku 4-7 vychází z negativu plochy dosedající na podložku, který má za úkol ustavit orientaci a omezit pohyb modulu vůči přípravku. Pro pevnější a jistější ustavení přípravku byly podepřeny podpěrou pro každý vertikální vývod z modulu, který je dostupný z podložky. Tyto podpěry byly odlehčeny vybráním. Tento koncept byl navrhován jako varianta pro rychlé použití s pouhým vložením modulu do přípravku. Koncept je možné modifikovat a udělat podpěry vyměnitelné s využitím tvarových prvků. Pokud není vyžadována vyměnitelnost částí přípravku, bylo by možné podpěry tisknout zvlášť od hlavního těla přípravku a následně zalepit na pozici, docílit tak možnosti rychlejšího tisku přípravku.

#### Koncept 2

Při druhém konceptu přípravku na šroubování 4-7 složeného ze dvou částí byly pro spojení těchto dvou těl použity šrouby. Konkrétně byly využity tři hlavní šrouby, které tvoří hlavní spojení a dva podpůrné šrouby, které byly umístěny do podpůrného žebra. Počet použitých šroubů nebyl stanoven na základě pevnostního výpočtu, jelikož i jeden šroub by dokázal vydržet větší zatížení než samotný tištěný přípravek. Volba počtu šroubů byla tedy motivována snahou o zvýšení celkové tuhosti přípravku. Kromě šroubů byly použity další prvky, jako například kloubová upínka, podpora využitá pro výstupky modulu a podpora bránící vyklonění modulu v blízkosti kloubové upínky. Při sepnutí upínky se modul vzpříčí vůči liště a vznikne tak pevné uchycení modulu.





**Obrázek 4-7** Koncept 1 vlevo a koncept 2 vpravo

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Montáž se skládá z několika operací, pro které se často používají různé přípravky. Proto jsou na pracovní ploše montážní linky připevněny rámečky, do kterých jsou odkládány přípravky pro následující nebo již proběhlé operace. Společným rysem těchto přípravků je, že jsou tvořeny základním tělem, které má rozměry 151,5 mm na 181,5 mm. Toto tělo odpovídá velikosti rámečku, umístění přípravku do rámečku zabraňuje nechtěnému pohybu přípravků po pracovní ploše. Rámečky dále vymezují plochu pro umístění přípravku a je tak udržován pořádek na pracovišti.

### 5.1 Volba řešení

Důležitým parametrem pro volbu konstrukčního řešení je pevnost uložení modulu, aby nedošlo ke zvrtnutí modulu, a druhým podstatným parametrem je rychlost a snadnost upínání obrobků. Rychlost je důležitá zejména při montáži objemnějších zakázek a také aby byla obsluze ušetřena práce. Protože se jedná o ryze průmyslový produkt, estetický vzhled přípravku nebyl zájmem této práce. Při výběru konceptu přípravku využitého k operaci lisování byl zvolen koncept 1. Tento koncept byl více vhodný pro FDM tištěný způsob výroby a díky větším podpurným plochám bude snazší vkládání součástí do přípravku. Přípravek pro operaci šroubování byl zvolen koncept 2, který umožňoval pevnější a stabilnější upnutí. Z důvodu časové dotace se tato práce nezabývá hledáním optimalizovaného řešení vzhledem k pevnosti a využití materiálu, také to není náplní této práce.

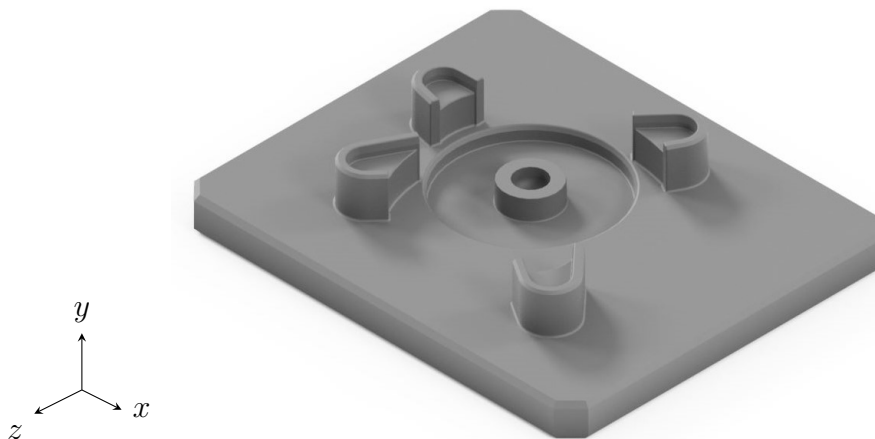
### 5.2 Konstrukce přípravků

#### 5.2.1 Přípravek určený pro operaci lisování

Na obrázku 2-9 můžeme vidět díl vkládaný do přípravku. Přípravek 5-1 byl navržen s hlavní podporou ve středu přípravku. Tato podpora má za úkol přenést všechnu lisovací sílu a tedy jí bylo třeba navrhnout s dostatečně velkou dosedací plochou, aby nedocházelo k příliš velkým deformacím, které by mohli ovlivnit montáž. Tato deformace byla kontrolována v rámci MKP výpočtového modelu 5.3. Součást je pozicována v přípravku pomocí 4 podpor, které mají tvar uzpůsobený pro snadné vkládání dílů a jsou tvarově navrženy vzhledem k vkládanému dílu. Model byl rozšířen o podstavu která je definovaná rámečkem na pracovní ploše a slouží k umístění přípravku. Následně dle kapitoly 3 byly určeny parametry pro tisk přípravku. Prvním z parametrů byla hustota výplně 90 % a typ výplně byl zvolen gyroid s výškou vrstvy 0,2 mm.

#### Náklady na výrobu přípravku

Doba tisku finálního přípravku byla 2 dny 8 h, cena za spotřebovaný materiál činila 225,91 Kč se spotřebou elektrické energie na tisk 6,6 kW s cenou 10 Kč za 1 kW. Celková cena za tento přípravek s prací oceněnou na 100 Kč činí 391,91 Kč.



**Obrázek 5-1** Konstrukční řešení přípravku pro operaci lisování

## 5.2.2 Přípravek určený pro operaci šroubování

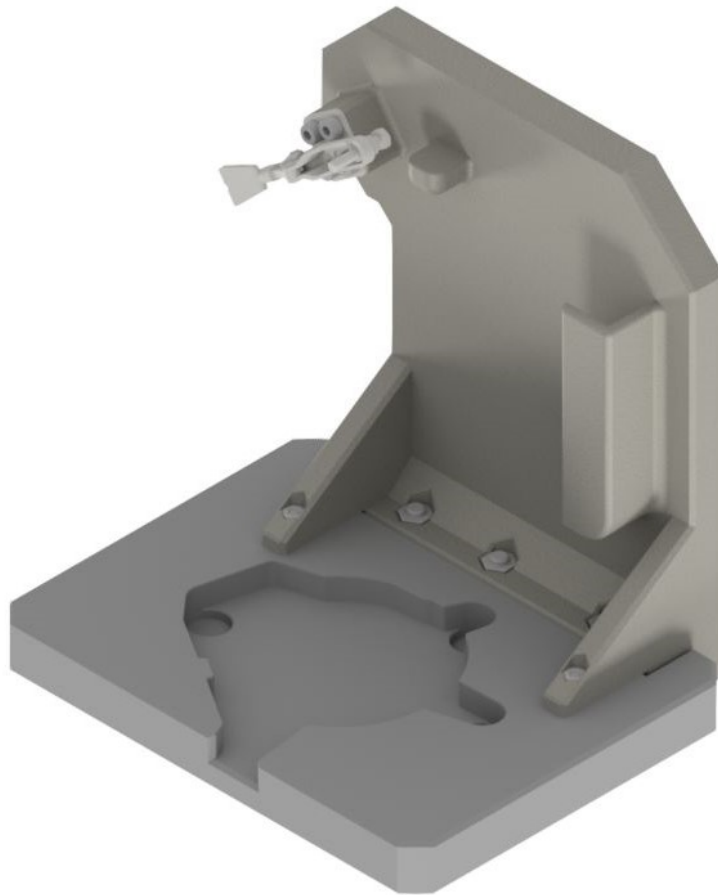
Jako podstava modul v přípravku byl použit negativ obvodové hrany a obsah touto křivkou vytvořené plochy modulu. Díky tomuto prvku v přípravku se vytvoří dobrá stabilita modulu, která je potřebná, protože jsou některé šrouby v rámci montáže relativně vzdálené od těžiště. Přítlak při šroubování vytvoří moment, při kterém dojde k převrácení modulu. Z tohoto důvodu byla k přípravku vytvořena svislá plocha, která byla vyztužena podpůrným žebrem k základní desce pro zvýšení tuhosti. Na svislou plochu byly přidány zbylé dva prvky, jimiž jsou kloubová upínka a vystouplá drážka. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, tyto dva prvky vytvoří páku, a tedy pevně upnou modul. Modul se ukládá do přípravku shora s tím, že nožička modulu se zasune do vytvořené drážky. A jedna z těchto dalších nožiček je využita pro kloubovou upínku, která ji připne k této svislé ploše, jak je na obrázku 5-2.

### Náklady na výrobu přípravku

Pro určení ceny přípravků z parametrů bylo opět vycházeno z informací poskytnutých od obsluhy 3D tiskárny [34]. Základna přípravku byla tištěna 1 den 17 h s cenou za materiál 179,29 Kč, spotřebou elektrické energie 4,86 kW opět s cenou 10 Kč za 1 kW a cenou za práci 100 Kč. S cenou za díl 327,89 Kč. Zadní část přípravku s dobou tisku 1 den 21 h, cenou za spotřebovaný materiál v hodnotě 198,47 Kč se spotřebou elektrické energie na tisk 5,44 kW a opět s 100 Kč za obsluhu cena dílu činí 352,87 Kč. Cena spojovacího materiálu a upínky byla určena na základě prodejní ceny v internetových obchodech na 166 Kč. Tedy celková cena byla vyčíslena na 580,76 Kč bez spojovacího materiálu a 746,76 Kč za kompletní přípravek.

**Tabulka 5-1** Cena a doba výroby přípravků

	Přípravek	Cena (Kč)	Doba výroby
Ocelové přípravky	Přípravek pro operaci lisování	22 000	1 měsíc
	Přípravek pro operaci šroubování	38 000	
3D tištěné přípravky	Přípravek pro operaci lisování	391,91	2 dny 8 h
	Přípravek pro operaci šroubování	746,76	3 dny 14 h



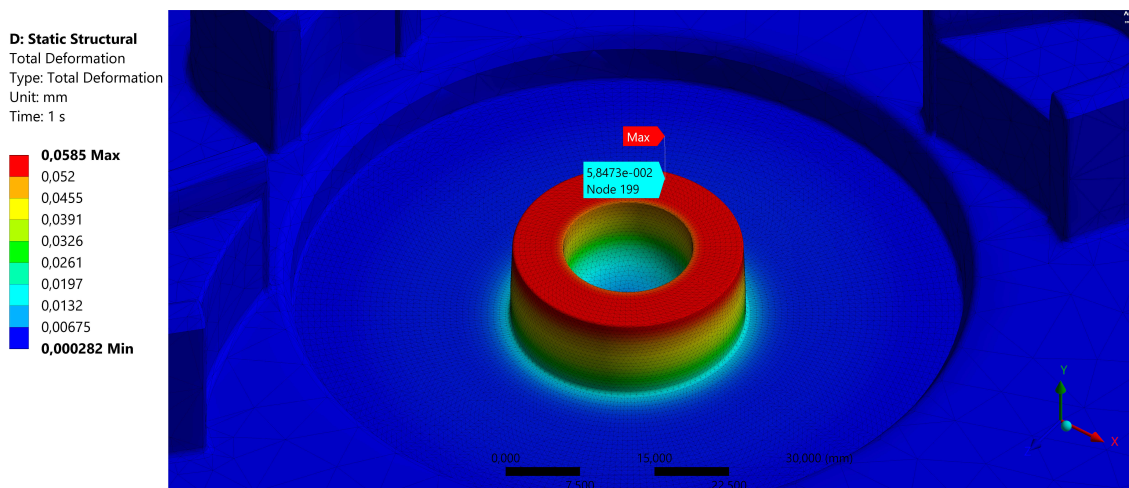
Obrázek 5-2 Konstrukční řešení přípravku pro operaci šroubování

### 5.3 Analýza zatížení v softwaru Ansys-Workbench

V této podkapitole bude řešeno zatížení pouze přípravku pro operaci lisování, protože u přípravku na operaci šroubování síly od montáže nejsou tak velké, aby způsobily nějaké majoritní zatížení a případný defekt. U přípravku pro šroubování nebyl k dispozici model modulu, a tedy případný přenos těchto malých sil do přípravku by byl velice vzdálený od reality. Data pro nastavení modelu vychází z podkapitoly 4.2, která popisovala nastavení modelu pro analýzu v softwaru, a v této kapitole budou tyto poznatky aplikovány na lisovací přípravek.

Model přípravku byl naimportován do prostředí Ansys-Workbench static structural a následně byl připraven pro analýzu nastavením vlastností materiálu. Prvky v zatížené oblasti jsou nastaveny na velikost 0,5 mm. V prostředí modelu byly nastaveny okrajové podmínky pro upevnění v prostoru, a to displacement se zamezeným posuvem ve vertikálním směru neboli osy y dle obrázku 5-1. Dále na obvodu této spodní plochy byly umístěny okrajové podmínky displacement se zamezeným posuvem v ose z pro hranu rovnoběžnou s touto souřadnicí a displacement se zamezeným posuvem pro osu x pro hrany rovnoběžné s touto hranou. Tyto podmínky byly zvoleny na základě nastavení v podkapitole 4.2, kdy se tato varianta nejvíce shodovala s realitou a umožnila objemový model upevnit v prostoru. Výsledný posuv je zobrazen na obrázku 5-3 výřezu přípravku, zobrazujícím ovlivněnou oblast přípravku. Maximální hodnotou posunutí je 0,059 mm při aplikování

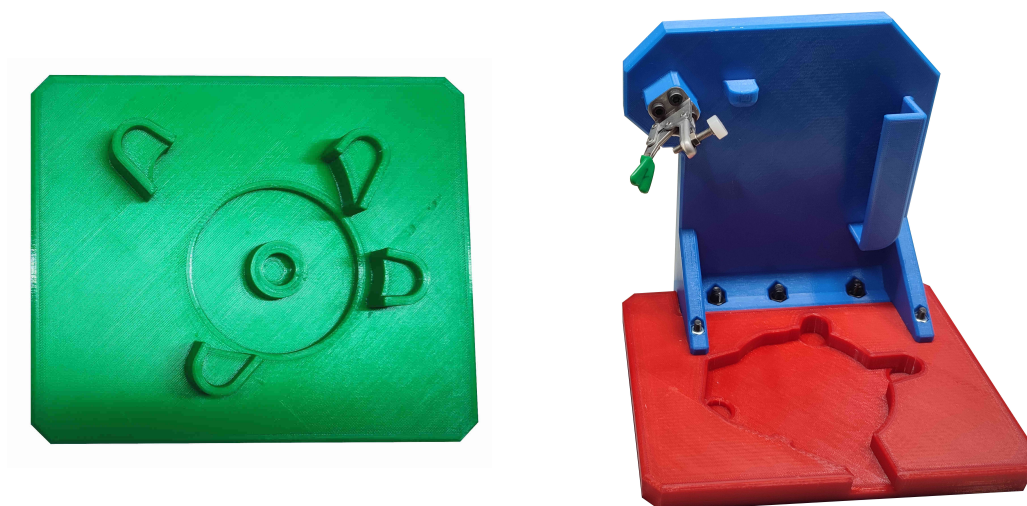
lisovací síly. V rámci tohoto posunutí se jedná pouze o elastické deformace, které by měly mít pouze minoritní vliv na výslednou montážní operaci. Případný vliv bychom případně naměřili v rámci funkčního testu a porovnání měření na kovovém přípravku.



Obrázek 5-3 Přípravek zatížený lisovací silou v Ansys-Workbench

## 5.4 Funkční test

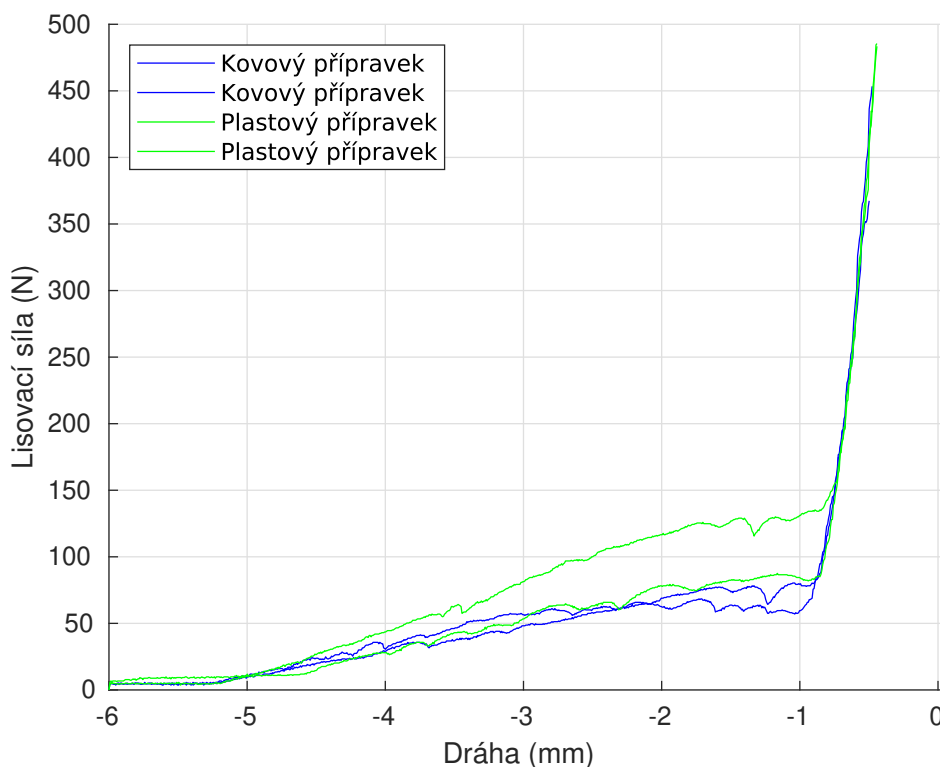
Funkční test, neboli reálná montáž na přípravcích byla provedena na přípravcích na zobrazených obrázku 5-4.



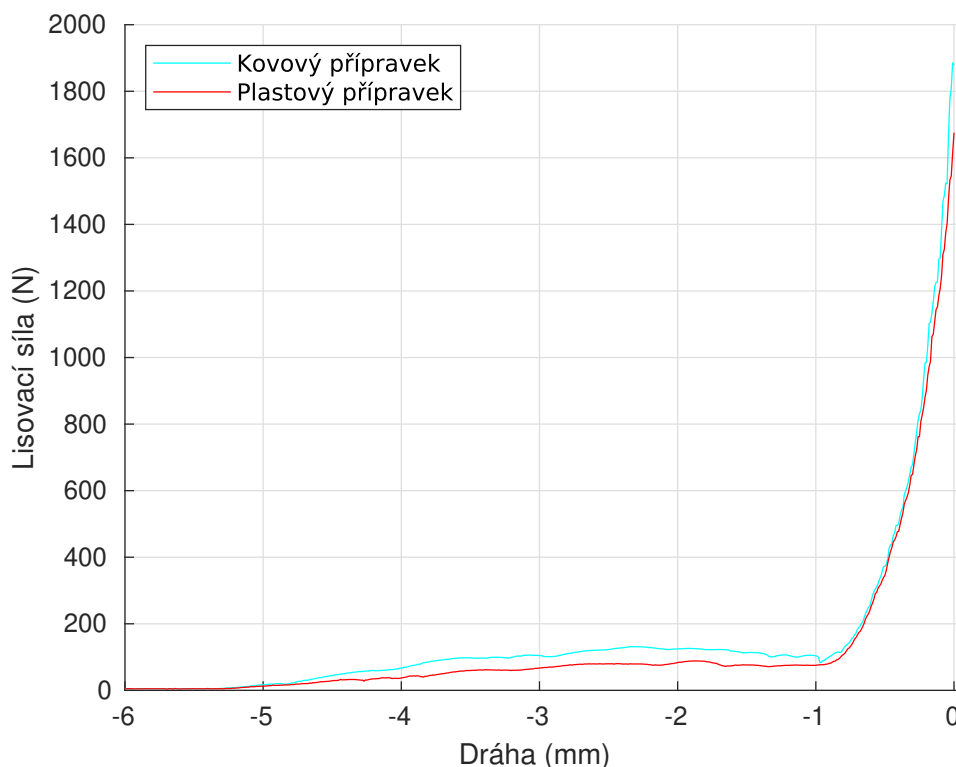
Obrázek 5-4 Prototypy přípravků pro montáž

### 5.4.1 Funkční test přípravku pro operaci lisování

V této kapitole je popsán experiment zalisování požadované komponenty do jednoho z krytů na modulu provedeném na přípravku původním (obrázek 2-7) a na přípravku, který byl navrhnut v této práci. Teto proces je zobrazen na obrázku 2-9, kde můžeme pozorovat trn s nasazenou černou komponentou nad místem pro zalisování do krytu modulu. Kryt je usazen v přípravku navrženém v této práci, popsáném v kapitole 5.2.1. V obrázku 5-5 můžeme vidět výsledky z funkčního testu, kde jsou v jednom grafu vykreslena všechna měření pro obě varianty přípravku. Zde se jednalo o klasické lisování komponenty, jak předepisuje dokumentace k této operaci. V grafu 5-6 jsou zobrazena měření lisování, která byla provedena nad rámeček funkčního testu, kde byla vyvolána větší síla, než byla potřebná pro zalisování komponenty. Všechny křivky končí přibližně na stejné lisovací síle a s podobnou dráhou, z toho vyplývá, že lisování komponenty ve všech případech proběhlo úspěšně. Lis doplňuje software, který vyhodnocuje výstup senzorů na lisu a zobrazil průběhy měření a toleranční pole. Tato pole slouží k určení správného průběhu lisovacích křivek. Každá křivka musí procházet předdefinovanými poli, aby bylo lisování vyhodnoceno jako vyhovující. Všechna křivky byly softwarem lisu vyhodnoceny jako vyhovující. V grafu 5-5 můžeme také pozorovat drobné rozdíly průběhů křivek, ovšem to je dáno kvalitou mazání a také se jedná o ruční lis, tedy přítlačná síla není v vždy v různých měřeních stejná.



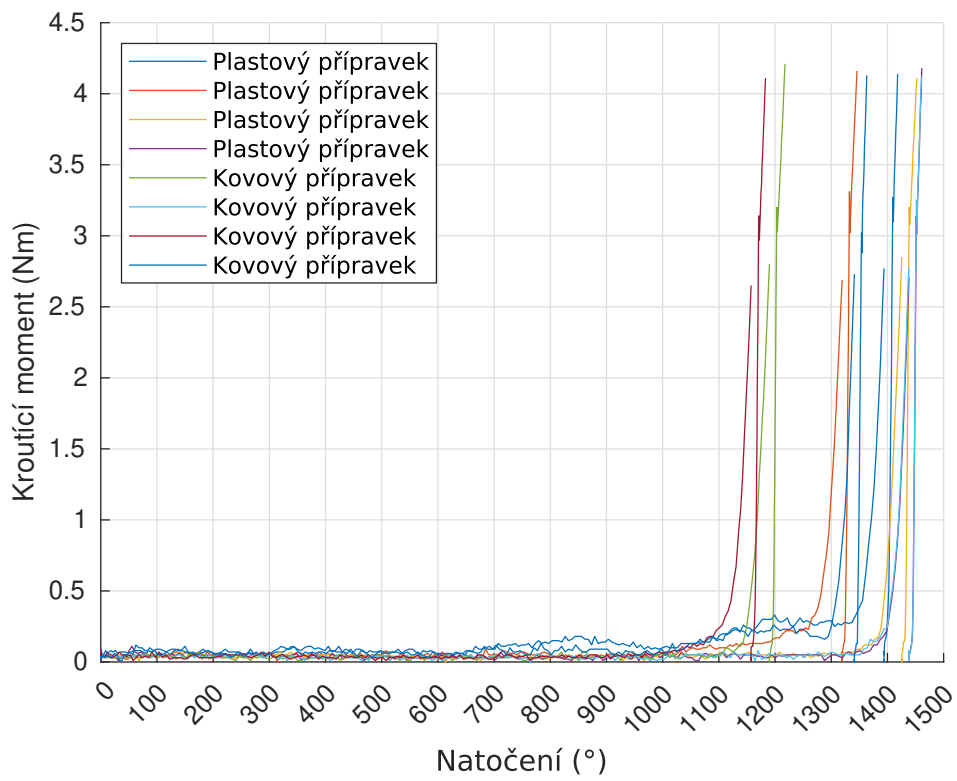
Obrázek 5-5 Lisování komponenty v přípravcích



Obrázek 5-6 Působení nadměrné síly při lisování

#### 5.4.2 Funkční test přípravku pro operaci šroubování

Tento test byl opět proveden pro porovnání přípravku původního a přípravku, který byl navržený v této práci. Montované šrouby jsou zvýrazněny červeným kruhem na obrázku 2-8. Výsledné křivky jsou vyobrazeny v grafu 5-7. V tomto grafu jsou zobrazena všechna měření, neboli závislost kroutícího momentu na natočení. Měření byla provedena na kovovém a FDM tištěném přípravku, kdy na každém přípravku byla provedena 4 měření, celkem tedy 8 měření. Dvě měření jsou odloučená od ostatních, ovšem to pouze poukazuje na to, že byl šroub buď už uchycen za větší část závitu před šroubováním, nebo se závit dříve začal prořezávat do materiálu. Výsledný potřebný utahovací moment 4,1 Nm byl dosažen u všech měření. V grafu 5-7 také můžeme vidět způsob, jakým je šroubování prováděno. Při šroubování dochází k utahnutí šroubu utahovacím momentem mezi 2,5 Nm a 3 Nm, následným povolením momentu na nulu a následným dotažením na požadovaný moment. Z grafu 5-7 můžeme vidět, že se všechna měření téměř shodovala, a tedy není pozorován rozdíl mezi přípravkem kovovým a FDM metodou tisknutým. Jediný rozdíl je na horizontální časové ose, který je dán počátkem, kdy se šroub začal zařezávat do modulu.



Obrázek 5-7 Funkční test šroubování na přípravcích



## 6 DISKUZE

Obsahem řešeršní části byl výběr vhodného materiálu, kterým byl zvolen PETG a to především kvůli jeho dobré pevnosti a dobré houževnatosti s výhodou poměrně lehkého tisku. Dále byl pro PETG sepsán souhrn poznatků o chování 3D tištěných dílů, zejména z hlediska mechanických vlastností. Popis těchto vlastností se ukázal jako nejednoznačný, zejména kvůli nezanedbatelné nehomogenitě 3D tištěného materiálu. Popsání chování tištěného materiálu, bylo důležité zejména pro výběr vhodných parametrů pro tisk přípravků a tvorbu modelu pomocí MKP. Tato problematika byla řešena využitím měření na tištěných deskách, které simulovaly proces lisování. Následně byla vyhodnocena data pro model v rámci MKP.

V koncepční části bylo nejprve experimentálně ověřeno chování 3D tištěných PETG desek. Testovací vzorky byly navrženy, aby co nejlépe odpovídaly reálným podmínkám. Pro vzorky bylo použito zjednodušení ve formě 100% výplně. Variabilita hustoty výplně by vnesla do popisu chování další proměnné. Různé průměry zatěžovacích trnů simulovaly odlišné opěrné plochy přípravků. Experiment se 100% výplní posloužil jako základ pro okrajový popis chování, ze kterého následný návrh vycházel. V řešerši uvedené studie o chování tisku se změnou výrobních parametrů, posloužili ke korekci těchto vlastností. Výsledky měření se přibližují výsledkům pracím Sofiane Guessasma, Sofiane Belhabib a Hedi Nouri [15] a Soham Teraiya, Swapnil Vyavahare a Shailendra Kumar [17]. Naměřená data posloužila při konstrukci přípravku, k návrhu velikosti opěrné plochy. Tato informace je důležitá, aby při lisování nedocházelo k příliš velkým deformacím. Získané hodnoty také byly použity pro tvorbu modelu pomocí MKP. Metoda MKP v této práci posloužila pro predikci deformace u konstrukčního řešení přípravku, k operaci lisování. Na základě vypočtené deformace, byla vyhodnocena funkční opěrná plocha. Pro každý typ operace byly navrženy dvě koncepční řešení se dvěma přístupy.

Samotný konstrukční návrh byl vytvořen poměrně konzervativním přístupem. To otevírá možnost dalšího drobného vývoje přípravků, s ohledem na zkrácení výrobních časů a s tím spojených nákladů. Před samotnou výrobou byla provedena u lisovacího přípravku analýza deformace pomocí MKP. Při pracovním zatížení přípravku byla vypočítaná zanedbatelná deformace. Z výsledků reálné montáže, na přípravku kovovém a plastovém u montážní operace lisování, můžeme vidět mírné odchylky v měřeních ve střední oblasti grafu 5-5. Tento typ odchylek není ničím neobvyklým. Na přístroji v montážní lince, zobrazujícím silový průběh, jsou k dispozici i nadefinovaná toleranční pole, ve kterých se průběh může pohybovat. Všechna tato měření těmito poli prochází, tedy zalisování komponenty je pro oba přípravky validní. V druhém grafu 5-6 byla provedena dvě měření, která také vyhovují tolerančním polím do montážní síly. Následně je lisovací síla zvýšena až na 1600 N, v obou případech pro téměř stejnou dráhu. Průběh montáže na plastovém přípravku odpovídá průběhu u kovového i pro navýšenou lisovací sílu. Na druhé sadě přípravků byla také provedena reálná montáž operace šroubování. Výstupem montáží byla naměřena data, zobrazena v grafu 5-7. Graf ukazuje závislost kroutícího momentu elektrického šroubováku a úhlu natočení. Z průběhů vyplývá, že pro oba přípravky byly naměřeny shodné výsledky. Nebyly pozorovány žádné odchylky v závislosti na použitém přípravku. Při zarovnání křivek, dle jejich koncového bodu, se křivky shodovaly. Opomíne-li drobné odchylky, které ovšem nebyly závislé na druhu přípravku. Dalším hodnoceným parametrem v kapitole, byla cena a čas potřebný k výrobě přípravků. Z tabulky 5-1 je jasně viditelné, že cena i čas výroby je řádově výhodnější pro 3D tištěné přípravky.

Po provedení montáže bylo potvrzeno, že tištěné přípravky jsou schopné být použity pro montáž modulů. Poskytnout nám tak variabilitu a cenově příznivou variantu k přípravkům kovovým. Vhodnost přípravku je omezena zejména podpůrnými plochami, což bylo potvrzeno v rámci testování. V případě malé kontaktní plochy přípravku s modulem, či součástí modulu, může dojít k jeho výrazným deformacím a tedy poškození přípravku. V horším případě poškození součástí. Bylo by vhodné využití tištěného přípravku s kovovým prvkem podepírajícím součást.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zaměřena na vývoj přípravku pro prototypovou montáž, tištěného FDM metodou. Výsledkem této práce, je funkční prototyp jenž je schopný stát se náhradou za přípravky kovové. Součástí je i zhodnocení celkového využití FDM technologie pro podporu výroby přípravků s ohledem na ekonomičnost výroby. Značným přínosem práce, jsou možné významné úspory nákladů u prototypové montáže. Tato práce vznikla ve spolupráci se společností Schaeffler Production CZ, s.r.o., která poskytla potřebné prostředky pro realizaci této práce.

Hlavním cílem této práce je zhodnotit vhodnost využití 3D tisku plastů při prototypové montáži. Hodnocení vycházelo z porovnání vlastností na dvou přípravních pro montážní operace lisování a šroubování. Dílčími cíli jsou, řešerše vhodného materiálu k 3D tisku, návrh vzorků a realizace testů pro ověření vlastností při tlakovém zatížení. Na základě získaných informací vytvoření modelu pro FDM tisk prototypového přípravku a následná výroba. Porovnání přípravku tištěného s přípravkem kovovým při reálné montáži, porovnání časů a nákladů na výrobu přípravků. Všechny cíle byly v rámci bakalářské práce splněny.

Experimentální měření deformace zpřesnilo hodnoty mechanických vlastností, které se v řešerši v závislosti na zdroji rozcházejí. Zejména je tak stanoven Youngův modul pružnosti, který je využit při analýze pomocí MKP na stanovení deformace lisovacího přípravku při montážním zatížení. Deformace vypočtená v MKP modelu je velice malá a v rámci reálné montáže není pozorován vliv této deformace. Při reálné montáži probíhá měření hodnot kroutícího momentu v závislosti na natočení u elektrickém šroubováku a působící síly v závislosti na poloze u přípravku na lisování. V rámci montáže provedené na obou druhích přípravků, kovového a plastového, není pozorován rozdíl mezi naměřenými hodnotami. Hlavní rozdíl je spojen s náklady, kdy cena a doba výroby je u FDM tištěných přípravků řádově nižší ve srovnání s přípravky kovovými. Výhodou FDM tištěných přípravků je i jejich hmotnost. Obsluze montáže ušetří námahu při výměně přípravku. Z těchto výsledků vyplývá, že FDM tištěné přípravky jsou pro firmu vhodnou a výhodnou náhradou za přípravky kovové a tedy technologií, kterou je vhodná pro další využití v prototypové výrobě.

Pro konstrukci budoucích přípravků, lze využít MKP pro optimalizaci využití materiálu a tedy navýšení úspor. Optimalizací je myšleno, že u konstrukce je možné využít částečného zhuštění výplně, v místech s působícím napětím. Naopak v místech bez zatížení, lze procentuální hustotu výplně snížit a dosáhnout tedy následné úspory na tištěném materiálu. Možnost dalšího uplatnění aditivních technologií ve společnosti Schaeffler, je příhodný v rámci produkce malosériové a sériové výroby prototypových komponent.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent; KHORASANI, Mahyar. *Additive Manufacturing Technologies* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2021 [cit. 2023-01-31]. ISBN 978-3-030-56126-0. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7.
- [2] *3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS* [online]. Somerville: Formlabs, c2023 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>.
- [3] DESTEFANO, Vincent; KHAN, Salaar; TABADA, Alonzo. Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration* [online]. 2020, roč. 1, č. 1, s. 76–87 [cit. 2023-01-31]. ISSN 26661381. Dostupné z DOI: 10.1016/j.engreg.2020.08.002.
- [4] *Express guide of FDM 3D printing materials* [online]. Newark: Treatstock, c2023 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.treatstock.co.uk/guide/article/118-express-guide-of-fdm-3d-printing-materials>.
- [5] MARK, James E. *Polymer Data Handbook*. 2. vydání. New York: Oxford University Press, 2009. ISBN 9780195181012.
- [6] *Handbook of materials selection*. První vydání. New York: John Wiley, c2002. ISBN 04-713-5924-6.
- [7] *Print Quality Troubleshooting Guide* [online]. Simplify3d, c2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/>.
- [8] *Overview of materials for PETG Copolyester*. [online]. Blacksburg: MatWeb, 2011 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: [https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0).
- [9] *Polyethylene Terephthalate Key Properties*. [online]. Campbell, California, United States: Phoenix Technologies, 2020 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.phoenixtechnologies.net/media/371/PET%5C%20Properties%5C%202008.pdf>.
- [10] *PETG DATA SHEET*. [online]. Wetherby: Rigid.ink, 2014 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: [https://devel.lulzbot.com/filament/Rigid\\_Ink/PETG%5C%20DATA%5C%20SHEET.pdf](https://devel.lulzbot.com/filament/Rigid_Ink/PETG%5C%20DATA%5C%20SHEET.pdf).
- [11] CARROLL, Beth E.; PALMER, Todd A.; BEESE, Allison M. Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia* [online]. 2015, roč. 87, s. 309–320 [cit. 2023-03-14]. ISSN 13596454. Dostupné z DOI: 10.1016/j.actamat.2014.12.054.
- [12] ZOHDİ, Nima; TAREQ, Saif; YANG, Chunhui. Investigation on mechanical anisotropy of high impact polystyrene fabricated via fused deposition modelling. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering Research and Practice (iCMMERP-2019): 24-28 November 2019, Sydney, Australia*. Minto Heights, N.S.W.: Science, Technology a Management Crescent Australia, 2019, s. 24–28. ISBN 9780648268185.

- [13] ALMEIDA, Rui; BÖRRET, Rainer; RIMKUS, Wolfgang. Simulation of the elastic properties of 3D printed plastic tension rods using Fused Deposition Modeling (FDM). *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)* [online]. 2020, roč. 9, č. 5, s. 18–21 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <http://www.irjes.com/Papers/vol9-issue5/D09051824.pdf>.
- [14] COLMENERO, Jorge Manuel Mercado; RUBIA, M. Dolores La; GARCIA, Elena Mata; SANTIAGO, Moises Rodriguez; DOÑATE, Cristina Martin. Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications. *Polymers* [online]. 2020, roč. 12, č. 10 [cit. 2023-02-01]. ISSN 2073-4360. Dostupné z DOI: 10.3390/polym12102202.
- [15] GUESSASMA, Sofiane; BELHABIB, Sofiane; NOURI, Hedi. Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling. *Polymers* [online]. 2019, roč. 11, č. 7 [cit. 2023-03-10]. ISSN 2073-4360. Dostupné z DOI: 10.3390/polym11071220.
- [16] SZYKIEDANS, Ksawery; CREDO, Wojciech; OSIŃSKI, Dymitr. Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints. *Procedia Engineering* [online]. 2017, roč. 177, s. 455–461 [cit. 2023-03-10]. ISSN 18777058. Dostupné z DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.245.
- [17] DAVE, Harshit K.; NEDELICU, Dumitru. *Advances in Manufacturing Processes* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2021 [cit. 2023-03-13]. ISBN 978-981-15-9116-7. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-9117-4\\_21](http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-9117-4_21).
- [18] SRINIVASAN, R.; RUBAN, W.; DEEPANRAJ, A.; BHUVANESH, R.; BHUVANESH, T. Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, roč. 27, s. 1838–1842 [cit. 2023-02-07]. ISSN 22147853. Dostupné z DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.797.
- [19] SRINIVASAN, R.; KUMAR, K. Nirmal; IBRAHIM, A. Jenish; ANANDU, K.V.; GURUDHEVAN, R. Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, roč. 27, s. 1801–1805 [cit. 2023-02-07]. ISSN 22147853. Dostupné z DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.777.
- [20] PANDZIC, Adi; HODZIC, Damir; MILOVANOVIC, Aleksa. EFFECT OF INFILL TYPE AND DENSITY ON TENSILE PROPERTIES OF PLAMATERIAL FOR FDM PROCESS. *Annals of DAAAM & Proceedings*. 2019, roč. 30.
- [21] KUMAR, K. Sathish; SOUNDARARAJAN, R.; SHANTHOSH, G.; SARAVANAKUMAR, P.; RATTEESH, M. Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, roč. 45, s. 2186–2191 [cit. 2023-02-07]. ISSN 22147853. Dostupné z DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.078.
- [22] ALGARNI, Mohammed; GHAZALI, Sami. Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. *Crystals* [online]. 2021, roč. 11, č. 8 [cit. 2023-02-08]. ISSN 2073-4352. Dostupné z DOI: 10.3390/cryst11080995.

- [23] *Z020* [online]. Brno: ZwickRoell, 2005 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/pre-owned-market/pre-owned-z020-allroundline-20-kn/>.
- [24] *Pro2 3D Printer* [online]. Irvine: Raise 3D Technologies, c2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.raise3d.com/products/pro2-3d-printer/>.
- [25] *Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S+* [online]. Prague: Prusa Research, 2019 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: [https://www.prusa3d.com/cs/produkt/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s-3/?gclid=CjwKCAjw5dqgBhBNEiwA7PryaOwVbotRvQhTQViQtN1UQ98MaSZREe5D0lMR\\_f3B5bBtptucoCxPexoCVYcQAvD\\_BwE%5C#Features](https://www.prusa3d.com/cs/produkt/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s-3/?gclid=CjwKCAjw5dqgBhBNEiwA7PryaOwVbotRvQhTQViQtN1UQ98MaSZREe5D0lMR_f3B5bBtptucoCxPexoCVYcQAvD_BwE%5C#Features).
- [26] *DSM* [online]. Aalen: DSM Messtechnik, c2023 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.dsm-messtechnik.de/en/tightening-technique/nutrunners-ds-serie/>.
- [27] *Load Washer* [online]. Winterthur: Kistler Group, c2009 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: [https://intertechnology.com/Kistler/pdfs/Force\\_Model\\_9101A\\_9104A.pdf](https://intertechnology.com/Kistler/pdfs/Force_Model_9101A_9104A.pdf).
- [28] *Potentiometric Displacement Sensors* [online]. Gernsbach: Burster praezisionsmesstechnik, c2023 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: [https://www.burster.com/fileadmin/user\\_upload/redaktion/Documents/Products/Data-Sheets/Section\\_8/8712\\_EN.pdf](https://www.burster.com/fileadmin/user_upload/redaktion/Documents/Products/Data-Sheets/Section_8/8712_EN.pdf).
- [29] GIMENO, Patricia. *How do water pumps with a thermal management module work?* [online]. Castellón: Dolz, 2021 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.idolz.com/en/2023/03/27/water-pumps-thermal-management-module/>.
- [30] *Schaeffler is a pioneer in intelligent thermal management in vehicles* [online]. Herzogenaurach: Schaeffler [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.schaeffler.com/en/technology-innovation/motorsport/why-we-race/thermal-management/>.
- [31] *Schaeffler bringing thermal management module to North American market; up to 4% improvement in fuel economy* [online]. BioAge Group, 2012 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2012/07/schaeffler-20120712.html>.
- [32] WEISS, Michael. Hot & Cold. *Solving the Powertrain Puzzle* [online]. 2014, s. 302–317 [cit. 2023-02-11]. ISBN 978-3-658-06194-4. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-658-06430-3\_21.
- [33] WEISS, Michael; HAHN, Klaus; GROSSKOPF, Uli. *Rotary slide valve ball for a thermal management module*. [B.r.].
- [34] VACEK, Václav. *Přípravky*. 2023. Dostupné také z: [vacekvcl@schaeffler.com](mailto:vacekvcl@schaeffler.com). E-mailová zpráva.
- [35] WEINBERG, Steven. *The basic mechanics of Toggle Clamps* [online]. Cambridge: EngineeringClicks, 2017 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/toggle-clamps-mechanics/>.
- [36] *Jak na tištěné „zacvakávací“ spoje, které se hned tak nezlomí* [online]. Brno: Nová média, 2017 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/tip-pro-3d-tisk-jak-na-tistene-zacvakavaci-spoje-ktere-se-hned-tak-nezlomi/>.

- [37] *GH-20800* [online]. THAILAND: GOODHAND, 2011 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: [https://th.misumi-ec.com/en/linked/vitem/mech/GHD1/221005336226/img/221005336226\\_1.jpg](https://th.misumi-ec.com/en/linked/vitem/mech/GHD1/221005336226/img/221005336226_1.jpg).
- [38] *Upínka DIN6314V výztuha 18/13-48mm FORMAT* [online]. Velatice: TOOLZONE, c2020 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.toolzone.cz/produkt/upinka-din6314v-vyztuha-18-13-48mm-format-23991.htm>.
- [39] *How do you design snap-fit joints for 3D printing?* [online]. Amsterdam: 3D HUBS, c2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-snap-fit-joints-3d-printing/>.
- [40] LIPINA, Jan; KRYŠ, Václav; SEDLÁK, Josef. Shaped Glued Connection of Two Parts Made by Rapid Prototyping Technology. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2014, roč. 555, s. 541–548 [cit. 2023-03-19]. ISSN 1662-7482. Dostupné z DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.555.541.

## Seznam obrázků

2-1	Konfigurace vzorků při tisku, upraveno dle [14]	15
2-2	Základní druhy výplní	16
2-3	Znázornění vlivu hustoty výplně viz tabulka 2-4	17
2-4	ZwickRoell Z020 [23]	18
2-5	Termoregulační modul [30]	20
2-6	Šoupátkový ventil [33]	20
2-7	Přípravek využitý pro operaci šroubování a přípravek využitý pro operaci lisování	21
2-8	Proces šroubování s vyznačením utahovaných šroubů	22
2-9	Proces lisování	22
2-10	Upínací mechanismy [37], [38], [39]	24
4-1	Přípravky použité k tlakovým testům	27
4-2	Data naměřená na desce o tloušťce 8 mm s trnem č. 2	28
4-3	Vykreslení všech měření pro trn č. 2 a tloušťku desky 8 mm	29
4-4	Porovnání deformace pro trn č.2 v závislosti na tloušťce desky	29
4-5	Model MKP využívající axisymetrii	31
4-6	Koncept 1 vlevo a koncept 2 vpravo	32
4-7	Koncept 1 vlevo a koncept 2 vpravo	33
5-1	Konstrukční řešení přípravku pro operaci lisování	35
5-2	Konstrukční řešení přípravku pro operaci šroubování	36
5-3	Přípravek zatížený lisovací silou v Ansys-Workbench	37
5-4	Prototypy přípravků pro montáž	37
5-5	Lisování komponenty v přípravcích	38
5-6	Působení nadměrné síly při lisování	39
5-7	Funkční test šroubování na přípravcích	40
A-1	Porovnání deformace pro trn č.3 v závislosti na tloušťce desky	52
A-2	Deformace pro trn č. 1 a desku 8 mm	52



## Seznam tabulek

2-1	Vlastnosti materiálů [5]	13
2-2	Vlastnosti PETG z materiálových listů [8]; [9]; [10]	14
2-3	Pevnosti dle druhu výplně dle [19] a [20]	16
2-4	Vlastnosti se změnou hustoty výplně [21]	17
4-1	Deformace pro trn č. 2 při zatížení 5000N	30
5-1	Cena a doba výroby přípravků	35

## Seznam použitých zkratek a symbolů

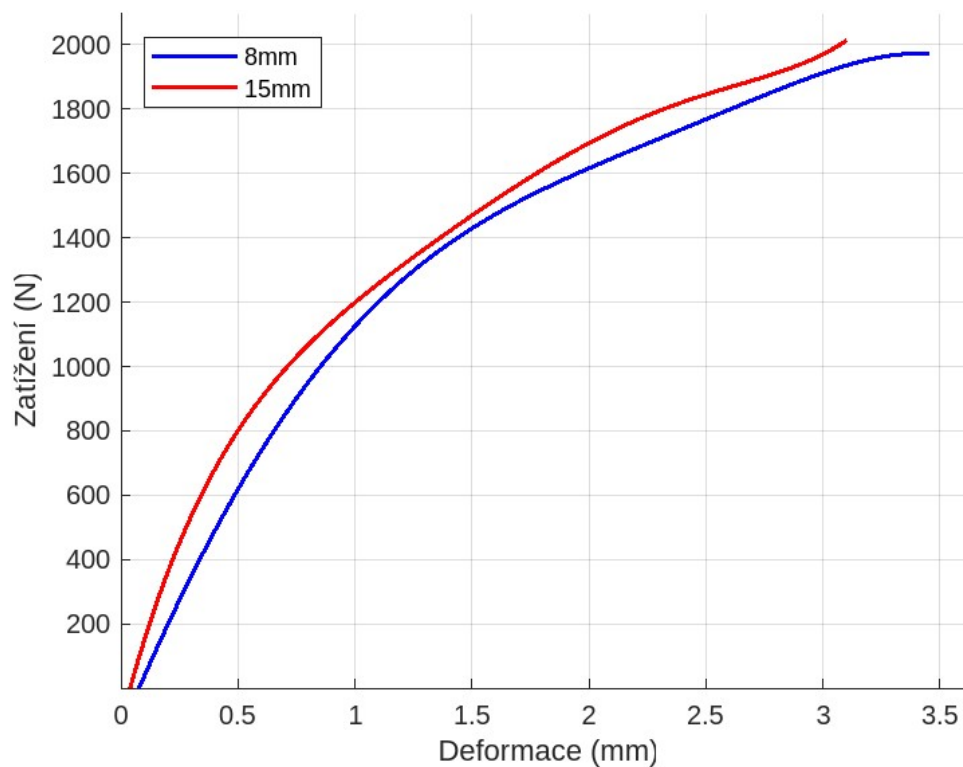
Zkratka	Význam
3D	Three-Dimensional
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASTM	American Society for Testing and Materials
Co.	Company
CZ	Česká republika
FDM	Fused Deposition Modeling
FEA	Finite Element Analysis
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
ISO	International Organization for Standardization
KG	Kommanditgesellschaft
PC	Polykarbonát
PETG	Polyethylene Terephalate Glykol
PLA	Polylactic acid
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
TMM	Thermal management module
MKP	Metoda konečných prvků

Symbol	Rozměr	Veličina
$F$	(N)	síla
$\delta$	(mm)	deformace
$\varepsilon$	(-)	prodloužení
$E$	(MPa)	Youngův modu
$L$	(mm)	tloušťka desky
$S$	( $mm^2$ )	plocha

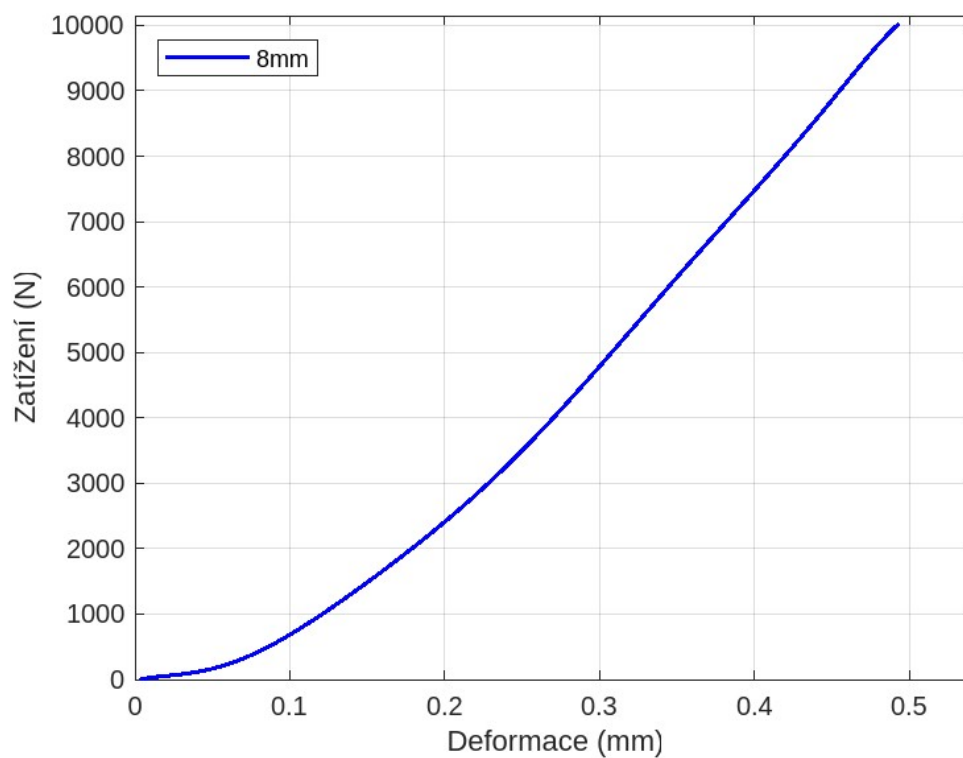
## Seznam příloh

**Příloha A** Naměřené grafy pro trny č. 1 a č. 3

## A Naměřené grafy pro trny č. 1 a č. 3



Obrázek A-1 Porovnání deformace pro trn č.3 v závislosti na tloušťce desky



Obrázek A-2 Deformace pro trn č. 1 a desku 8 mm