

Výroba antistatické podešve pomocí metody 3D tisku

Bc. Pavel Pravec

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Pavel Pravec
Osobní číslo:	T22356
Studijní program:	N0722A130001 Inženýrství polymerů
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Výroba antistatické podešve pomocí metody 3D tisku

Zásady pro vypracování

- Vypracujte rešeršní práci na téma antistatické obuvi a využití 3D tisku pro výrobu odlévacích a jiných forem.
- Vytvořte model podešve metodou 3D tisku, který poté použijte na výrobu formy.
- Z používaných odlévacích směsí a dostupných antistatických činidel připravte vzorky a změřte jejich elektrické a mechanické vlastnosti.
- Z vtipovaných směsí vytvořte podešev pomocí připravené formy.
- Dosažené výsledky vhodně graficky zpracujte, diskutujte a vypracujte závěry.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. TOMIS, František. Gumárenská a plastikářská technologie: zpracovatelské procesy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1987.
2. ROSATO, Dominick V.; ROSATO, Donald V. a ROSATO, Matthew V. Plastic product material and process selection handbook. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier, 2004. ISBN 185617431X.
3. GEBHARDT, Andreas. Rapid prototyping. Munich: Hanser Publishers, 2003. ISBN 159124868X.
4. WYPYCH, George a PIONTECK, Jürgen. Handbook of antistatics. Second edition. Toronto: ChemTec Publishing, 2016. ISBN 9781523104826.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Jurča, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Oponent diplomové práce: **doc. Ing. Alena Kalendová, Ph.D.**
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Jana Navrátilová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. března 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

V rámci diplomové práce byla vytvořena personalizovaná designová obuv s antistatickou podešví, která dosahuje celkového elektrického odporu 381,5 k Ω a splňuje požadavky normy ČSN EN ISO 20345. Použitím technologií rychlého prototypování byly naveženy detailní formy podešve, které byly odlity optimalizovanou kompozitní směsí, která dosahovala nízkého elektrického odporu při zachování mechanické odolnosti. Proces výroby byl přizpůsoben individuálním parametrům chodidla.

Klíčová slova: 3D tisk, aditivní výroba, polymerní materiály, antistatická směs, odlévací formy, obuvnické podešve, prototypy výrobků

ABSTRACT

In this thesis personalized designer footwear with an antistatic sole was created, which achieves a total electrical resistance of 381.5 k Ω and meets the requirements of the ČSN EN ISO 20345 standard. Using rapid prototyping technologies, detailed sole forms were developed and then cast with an optimized composite mixture that achieved low electrical resistance while maintaining mechanical durability. The manufacturing process was tailored to the individual parameters of the foot.

Keywords: three-dimensional printing, additive manufacturing, polymer materials, antistatic mixture, casting moulds, footwear soles, prototypes of products

Děkuji vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Marku Jurčovi, Ph.D., za odborné vedení, vstřícnost, a cenné rady při jejím zpracování. Poděkování patří také všem, kteří mě v průběhu práce podpořili.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ELEKTRICKÝ ODPOR	13
1.1 MĚRNÝ OBJEMOVÝ ODPOR	13
1.2 MĚRNÝ POVRCHOVÝ ODPOR.....	13
1.3 PERKOLAČNÍ PRAH	14
2 ANTISTATICKÁ OBUV.....	16
2.1 ČÁSTI OBUVI A JEJÍ KONSTRUKCE	16
3 RYCHLÉ PROTOTYPOVÁNÍ	17
3.1 ZÁKLADNÍ POSTUP ADITIVNÍ VÝROBY	17
3.2 FDM/FFF TISKÁRNY.....	18
3.2.1 Kartézská soustava souřadnic.....	20
3.2.2 Polární soustava souřadnic	20
3.2.3 Přímočaré kartézské 3D FDM/FFF tiskárny	20
3.2.4 XZ-Head (tzv. Bed Slinger) kartézské 3D tiskárny	21
3.2.5 XY-Head kartézské 3D tiskárny	22
3.2.6 Delta kartézské 3D tiskárny	23
3.2.7 H-Bot kartézské 3D tiskárny	24
3.2.8 CoreXY kartézské 3D tiskárny	26
3.2.9 Scara 3D tiskárny	28
3.2.10 3D tiskárny Polar.....	28
3.3 PRYSKYŘICOVÉ FOTOPOLYMEROVÉ 3D TISKÁRNY	29
3.4 DĚLENÍ FOTOPOLYMERIZAČNÍCH TISKÁREN	31
3.4.1 SLA pryskyřicové fotopolymerizační 3D tiskárny	32
3.4.2 DLP pryskyřicové fotopolymerizační 3D tiskárny	32
3.4.3 MSLA / LCD pryskyřicové fotopolymerizační 3D tiskárny.....	33
3.5 SLS SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SPÉKÁNÍ.....	33
3.6 SHRNUTÍ 3D TISKOVÝCH TECHNOLOGIÍ.....	34
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	35
4 NÁVRH SMĚSI A VOLBA MATERIÁLŮ	36
4.1 STANOVENÍ CÍLOVÉHO ODPORU PODEŠVE.....	36
4.2 VÝBĚR MATRICE A VODIVÉHO PLNIVA.....	36
4.2.1 PUR 400 od firmy Dawex Chemical.....	36
4.2.2 GAFORM E70 – Dawex Chemical.....	37
4.2.3 GAFORM E45 – Dawex Chemical.....	38
4.2.4 Vybraná vodivá plniva	38
4.3 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO TEST REZISTIVITY	38
4.4 MĚŘENÍ REZISTIVITY A STANOVENÍ PERKOLAČNÍHO PRAHU	39

5	TVORBA PODEŠVE A ODLÉVACÍ FORMY	42
5.1	KONSTRUKCE OBUVNICKÉHO KOPYTA.....	42
5.1.1	Tvorba 3D modelu obuvnického kopyta	42
5.1.2	Tisk a sestavení obuvnického kopyta	43
5.2	NÁVRH A TISK PODEŠVE	45
5.2.1	Vytvoření designu ve 2D.....	45
5.2.2	Tvorba 3D modelu podešve.....	45
5.2.3	Tisk podešve.....	50
5.3	VÝROBA SILIKONOVÉ FORMY	52
5.3.1	Vybrané silikonové směsi a separačního prostředku.....	52
5.4	ODLÉVÁNÍ FORMY	54
6	ODLÉVÁNÍ PODEŠVE A JEJÍ HODNOCENÍ.....	57
6.1	ODLÉVÁNÍ PODEŠVE	57
6.2	TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ PODEŠVE	58
6.2.1	Odolnost pryže proti otěru.....	58
6.2.2	Odolnost pryže proti oděru.....	59
6.2.3	Tahová zkouška	60
6.3	CELKOVÝ ODPOR PODEŠVE.....	61
6.4	KOMPLETACE PODEŠVE SE SVRŠKEM	62
	ZÁVĚR.....	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Antistatická obuv je důležitým prvkem pasivní ochrany v prostředích s rizikem elektrostatického výboje (ESD) v prostorech s výskytem hořlavých látek nebo citlivé elektroniky. Pro splnění normy ČSN EN ISO 20345 je nezbytné aby odpor obuvi byl v rozmezí 0,1–1 000 MΩ obuv však zároveň musí být mechanicky odolná a pohlná. Pro uživatele s atypickými chodidly však nenabízejí obvyklé způsoby výroby potřebnou flexibilitu pro přispůsobení ergonomie. Technologie rapidního prototypování umožňují rychlé přispůsobení, zklácení vývoje a náhladů. [1, 2]

Cílem práce bylo navrhnout, optimalizovat a experimentálně ověřit vlastností antistatické podešve vyrobené pomocí 3D tisku a odlévání silikonových forem. Pro výrobu podešve byla vyvinuta vlastní antistatická směs na bázi polyuretanové matrice a vodivého plniva. Složení této směsi bylo optimalizováno na základě měření měrného elektrického odporu pro zjištění perkolačního prahu a měřením mechanických vlastností. V rámci návrhu byly použity 3D skeny chodidel, podle kterých bylo vytvořeno individuálně přizpůsobené obuvnické kopyto a design podešve. Návrh a realizace svršku obuvi byla provedena ve spolupráci se studentem designu Vítem Šimonem Andráškem z FMK UTB a svršek sloužil k ukázání funkčnosti výrobního procesu. Práce přináší výstup v podobě výrobního procesu obuvi s antistatickou podešví vyzutím technologií rapidního prototypování.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTRICKÝ ODPOR

Elektrický odpor je míra odporu materiálu vůči průchodu elektrického proudu. Odpor závisí na materiálu, ze kterého je vodič vyroben a jeho délkou a průřezem. Odpor vzniká v důsledku interakcí mezi pohybujícími se nosiči náboje materiálem vodiče, což vede k disipaci energie ve formě tepla. [3]

$$R = \rho \frac{S}{l} \quad (1)$$

R	Elektrický odpor	[Ω]
ρ	Rezistivita	[Ω · m]
l	Délka	[m]
S	Průřez	[m ²]

1.1 Měrný objemový odpor

Měrný objemový odpor je materiálová konstanta, která je měřena mezi dvěma elektrodami umístěnými na protilehlých stranách vzorku, přičemž proud prochází skrz objem materiálu. Měrný objemový odpor se používá k hodnocení izolačních vlastností materiálů jako jsou např. kabelové izolace. Měrný objemový odpor je měřen podle normy ČSN EN 62631-3-1 a při použití kruhových elektrod se vypočítá podle následujícího vzorce: [4]

$$\rho_V = \frac{R_V \cdot S}{l} = \frac{R_V \cdot \pi \cdot d^2}{l \cdot 4} \quad (2)$$

Kde:

ρ _V	Objemová rezistivita vodiče	[Ω · m]
R _V	Objemový elektrický odpor vodiče	[Ω]
S	Průřez vodiče	[m ²]
l	Délka vodiče	[m]
d	Průměr vnitřní elektrody	[m]

1.2 Měrný povrchový odpor

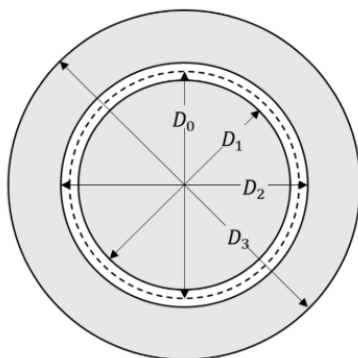
Měrný povrchový odpor je měřený mezi dvěma elektrodami umístěnými na stejné straně vzorku, přičemž proud protéká povrchem materiálu. Měrný povrchový odpor se uplatňuje tehdy, pokud proud neprochází objemem materiálu, ale šíří se po jeho povrchu. Je

důležitý při v případech, kde riziko elektrostatického výboje (ESD) může např. poškodit elektronické výboje, nebo způsobit požár. Měření je určeno normou ČSN EN 62631-3-2 a při měření kruhovými elektrodami se vypočítá podle následujícího vzorce: [5]

$$\rho_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_S}{\ln \frac{d_{vnější}}{d_{vnitřní}}} \quad (3)$$

Kde:

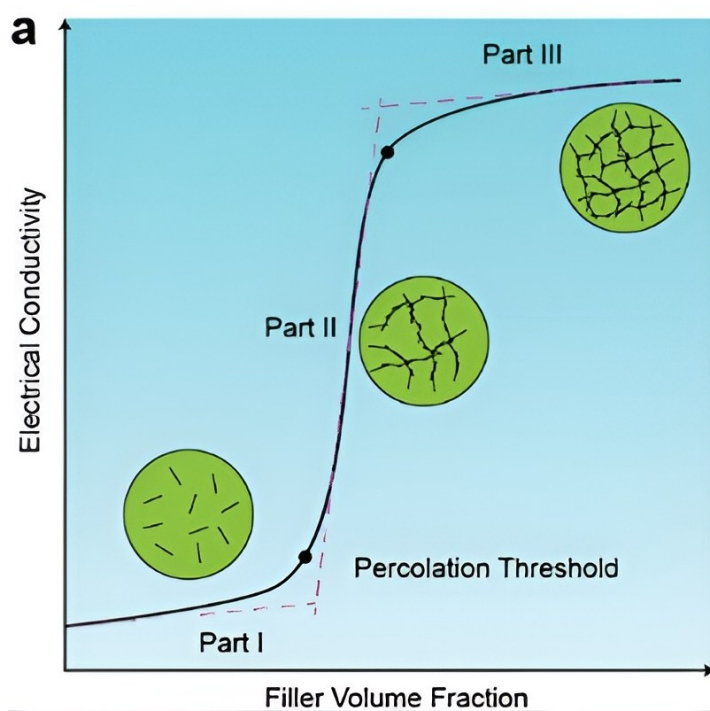
ρ_S	Povrchová rezistivita vodiče	[Ω]
R_S	Povrchový elektrický odpor vodiče	[Ω]
$d_{vnější}$	Průměr vnější elektrody	[m]
$d_{vnitřní}$	Průměr vnitřní elektrody	[m]



Obrázek 1: Sonda s kruhovými elektrodami [6]

1.3 Perkolační práh

Perkolační práh (p) je minimální koncentrace vodivého plniva v polymerní matrici, při které dojde k vytvoření spojitě sítě částic, umožňující vodivost skrze celý materiál. Před dosažením perkolačního prahu je materiál nevodivý, ale po jeho překročení vodivost prudce vzroste o několik řádů. Perkolačního prahu využívá při návrhu kompozitů, protože umožňuje dosáhnout výrazné změny vlastností i při malém množství plniva. Hodnota prahu závisí na tvaru, velikosti, orientaci a rozložení částic v matrici. V praxi se určuje měřením vodivosti při různých koncentracích plniva, typické hodnoty se pohybují v rozmezí 5–15 obj%. Zvláště nízkého obsahu plniva potřebného k dosažení perkolačního prahu lze dosáhnout použitím plniv s vysokým poměrem délky k průměru, jako jsou uhlíkové nanotrubičky, nebo použitím vysoce větvených sazí. [7, 8]



Obrázek 2: Typická perkolační křivka v grafu závislosti konduktivity na objemovém podílu plniva [9]

2 ANTISTATICKÁ OBUV

Antistatická obuv je zásadním prvkem ochrany proti elektrostatickému výboji (ESD) v průmyslových prostředích, kde může poškodit citlivé elektronické komponenty, nebo způsobit výbuchy v přítomnosti hořlavých látek. Tato obuv pomáhá odvádět nahromaděný elektrostatický náboj z těla uživatele do země.[1]

Podle normy ČSN EN ISO 20345 má elektrostatická obuv elektrický odpor v rozmezí 0,1–1 000 MΩ. Kombinace antistatické obuvi s vodivými podlahami a dalšími ESD ochrannými prostředky vytváří efektivní systém pro prevenci elektrostatických výbojů. [1]

2.1 Části obuvi a její konstrukce

Obuv lze složena ze čtyř základních částí:

- **Svršek (Shoe upper):** Horní sestava obuvi zhotovená z vrchových, popř. podšívkových a ztužovacích součástí a dílců
- **Podešev (Outsole):** Vnější část spodku obuvi, vystavená při nošení obuvi opotřebení
- **Podpatek (Heel):** Spodková součást nebo dílec, který zvyšuje a podpírá patní část nohy
- **Nárt (Vamp part):** Překrývá horní část chodidla, mezi špičkou a jazykem.

Pro výrobu obuvi se používá obuvnické kopyto, což je tvarovaný model chodidla, kolem něhož se formuje svršek během konstrukce obuvi. [1]



Obrázek 3: Diagram základních částí obuvi [10]

3 RYCHLÉ PROTOTYPOVÁNÍ

Rychlé prototypování (Rapid Prototyping) označuje vývoj fyzických objektů jinými než konvenčními výrobními procesy, jako je obrábění, odlévání a kování, kde se materiály odebírají z bloku nebo vstříkují do formy za účelem vytvoření produktu. Obvykle se jedná o výrobu fyzických prototypů na základě digitálních dat (CAD). Nejrozšířenější technologií je aditivní výroba, též známá jako 3D tisk, při které fyzický model vzniká postupným nanášením materiálu po vrstvách. Poskytuje vysokou flexibilitu při návrh produktu a komponenty, které je obtížné zhotovit konvenční výrobou, jakou jsou např. části s dutými prvky, je možné jednoduše zhotovit a geometrie komponentů lze snadno upravit. Tato technologie tak výrazně zkracuje čas výrobních cyklů a snižuje náklady. [2, 11, 12]

3.1 Základní postup aditivní výroby

Obecný postup aditivní výroby lze popsat v několika krocích:

1. **CAD MODEL:** Prvním krokem je vytvoření 3D digitálního modelu, obvykle pomocí CAD softwaru, nebo reverzním inženýrstvím pomocí 3D skeneru.
2. **Převod na STL model:** CAD model je převeden do formátu STL, jedná se o jeden z nejstarších formátů, ale je stále široce používán. Tento formát popisuje pouze povrchovou geometrii pomocí trojúhelníkových ploch, zatímco nejnovější AMF (additive manufacturing file) formát, umožňuje efektivnější popis geometrie, reprezentaci barvy, materiálu a mřížky.
3. **Řezání STL modelu:** STL je rozřezán na jednotlivé vrstvy pomocí tzv. Slicer softwaru.
4. **Generování dráhy nástroje a G-kódu:** Algoritmy pro generování dráhy určují vzory výplně a další faktory, přičemž výsledný G-kód řídí tiskárnu při výrobě
5. **Nastavení tiskárny a spuštění tisku:** Do tiskárny jsou zavedeny zvolené materiály a poté začíná automatizovaný proces výroby.
6. **Odstranění vytištěných objektů:** V závislosti na technologii aditivní výroby může být odstranění výtisku jednoduché nebo složitější.
7. **Post-processing:** liší podle technologie; některé procesy vyžadují vytvrzení, jiné mohou potřebovat odstranění podpůrných struktur nebo povrchovou úpravu. [12]

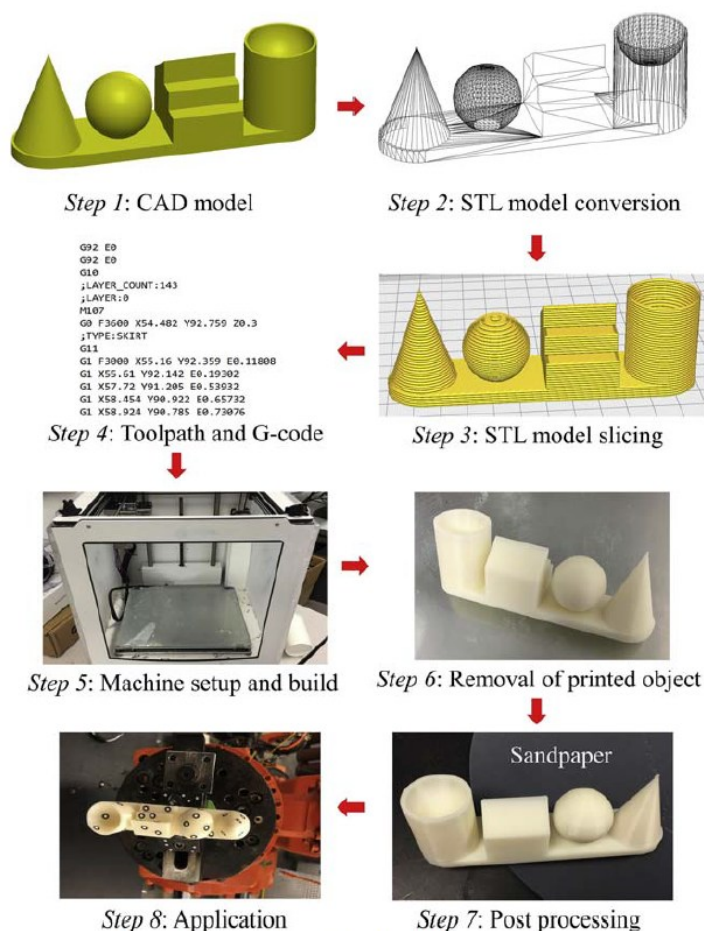


Figure 1.2 General procedure for additive manufacturing.

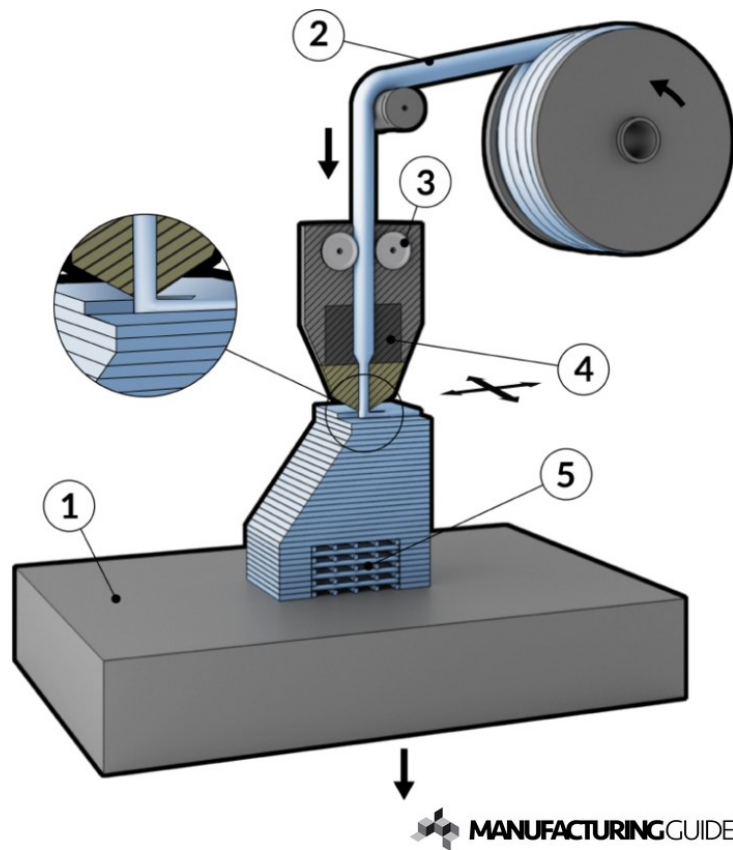
Obrázek 4: Základní postup aditivní výroby [12]

3.2 FDM/FFF tiskárny

Existuje několik hlavních typů 3D tiskáren, které se liší způsobem nanášení materiálu a použitými materiály. [12, 13]

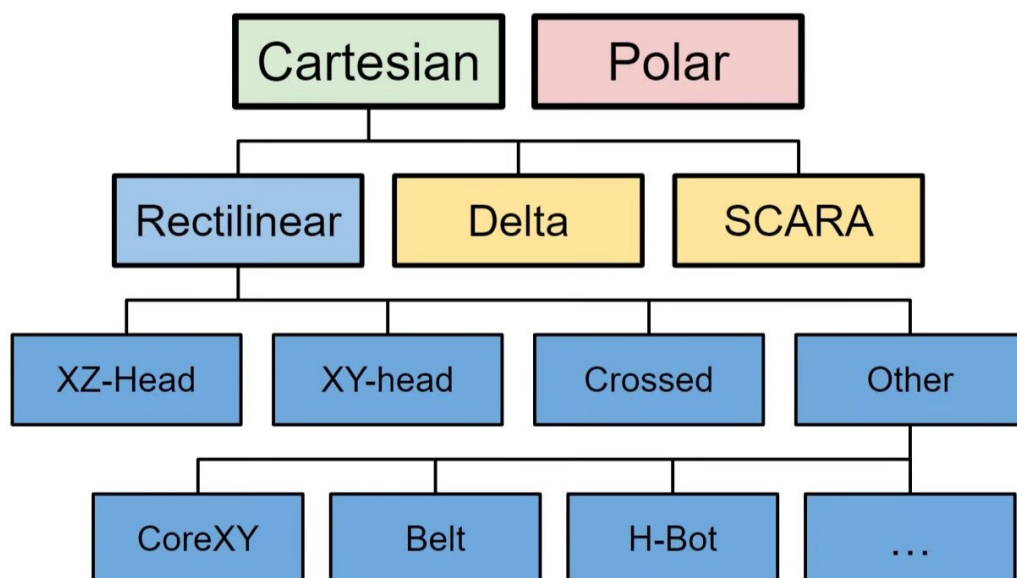
FDM je zkratka pro Fused Deposition Modeling, neboli FFF – Fused Filament Fabrication odkazuje na stejnou technologii. Ta funguje na základě tavení tiskové struny v pohybující se trysce tiskárny a roztavený materiál se postupně nanáší na podložce na sebe. Jedná se o nejrozšířenější druh 3D tiskáren, které používají filament nejčastěji o průměru 1,75 mm ($\pm 0,05$ mm). [12, 14]

Filament je tvořen různými druhy polymeru, mezi nejrozšířenější patří PLA, PET-G, ABS, ASA, TPE, HIPS, PC, TPU, Nylon a další. Tyto polymery jsou obvykle dostupné ve všech barvách. A mohou být i plněné kovem pro následnou sintraci. [15]



Obrázek 5: Schéma FDM/FFF tiskárny: pohyblivá platforma (1), plastový filament (2) je veden válečky (3) do tavicí trysky (4), která nanáší materiál a vytváří objekt (5) [16]

FDM/FFF tiskárny se dále dají rozlišit podle toho, jakou soustavu souřadnic používají pro pohyb tiskové hlavy v prostoru.



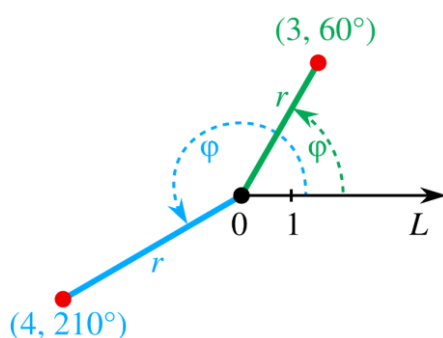
Obrázek 6: Příklad dělení FDM/FFF 3D tiskáren [17]

3.2.1 Kartézská soustava souřadnic

Naprostá většina FDM/FFF, používá tři dimenzionální kartézskou soustavu souřadnic. Ta se skládá z trojice čar, které procházejí společným bodem (počátkem) a jsou párově na sebe kolmé. Tyto čáry slouží jako číselné osy. [17, 18]

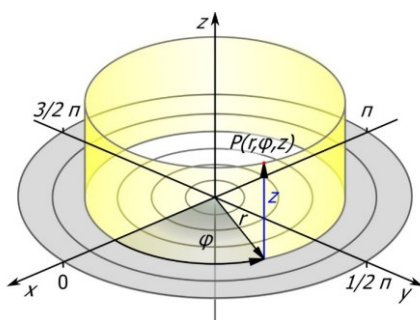
3.2.2 Polární soustava souřadnic

Ve dvou dimensionálním polárním souřadnicovém systému je každý bod v rovině určen vzdáleností (označována r) od počátku souřadnic (pólu) a úhlem (označován φ) mezi zvolenou osou ležící v rovině a úhlem který s ní bod svírá (viz Obrázek 7). [19]



Obrázek 7: Body v polárním souřadnicovém systému, počátek je značen číslem 0 a zvolená osa ležící v rovině je značena písmenem L, dále se souřadnicemi $[r = 3; \varphi = 60^\circ]$ a $[r = 4; \varphi = 210^\circ]$ [19]

Pro získání třetí dimenze používají 3D tiskárny válcový souřadnicový systém, kdy je do plošné soustavy rovnic navíc přidána vertikální osa Z, viz Obrázek 8. [19]



Obrázek 8: Válcový souřadnicový systém, každý bod je určen vzdáleností od počátku (r), úhlem φ a výškou nad rovinou souřadnicového systému (Z) [19]

3.2.3 Přímočaré kartézské 3D FDM/FFF tiskárny

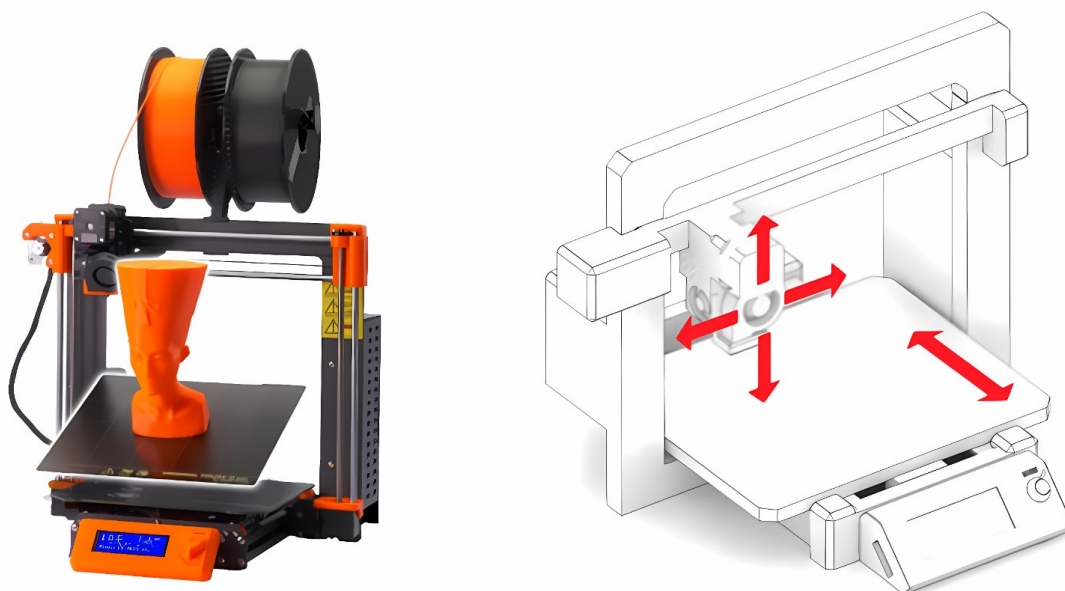
Charakteristické pro ně je, že mají alespoň 3 motory pohybující částmi tiskárny podél os kartézského souřadnicového systému. Osa X a Y definuje souřadnice pro tisk jedné vrstvy,

jakmile je hotova, tak se osa Z posune o jednu vrstvu výš a tiskne se další vrstva. Tento posun osy Z je zajištěn buďto pohybem tiskové hlavy, nebo podložky. [12, 14, 17]

Tiskárny, které jsou vybaveny minimálně třemi motory umožňujícími nezávislý pohyb částí podél os třírozměrného kartézského souřadnicového systému, bývají často označovány jako kartézské tiskárny. V této práci je však rozlišováno, v jakém souřadnicovém systému jsou koordinace určeny, a tak do kartézské kategorie jsou zařazeny i tiskárny, jejich motory ovládají osy, které nejsou rovnoběžné s osami kartézského souřadnicového systému, nebo je pohyb jejich motorů na sobě závislý. [12, 14, 17]

3.2.4 XZ-Head (tzv. Bed Slinger) kartézské 3D tiskárny

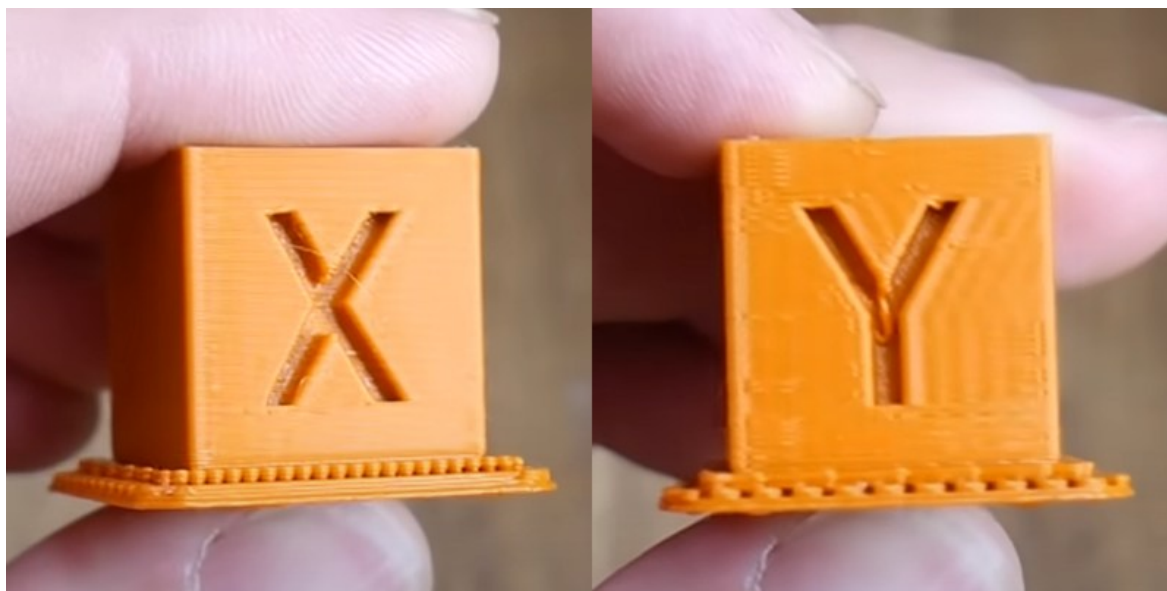
Jedná se o nejčastější rozložení přímočarých kartézských tiskáren. Motor(y) osy X řídí tiskovou hlavu v horizontálním směru, motor(y) osy Y řídí lůžko a motor(y) osy Z řídí výšku tiskové hlavy. Motory řídící pohyb částí tiskárny v jednotlivých osách jsou na sobě nezávislé. [12, 14, 17]



Obrázek 9: FDM tiskárna XZ-Head (Bed Slinger) [14]

Největší výhodou toto druhu tiskárny je její jednoduchost na pochopení. A to jak pro uživatele, tak pro výrobce, kteří nemusí vymýšlet složitý software a v tiskárně mohou použít méně výkonný mikro-ovladač díky relativně jednoduchým výpočtům kinematiky. Z tohoto důvodu jsou tiskárny levné a vhodné pro začátečníky. [12, 14, 17]

Nevýhodou Bed Slingeru je vyšší hmotnost pohybující podložky, což má za následek pomalejší rychlost tisku a vyšší tendenci k rezonanci konstrukce, která má negativní vliv na kvalitu tisku. Toto je obzvláště patrné při tisku modelu s velkou hmotností, protože ten přidává na hmotnosti, kterou motor(y) osy Y musí hýbat. [12, 14, 17]

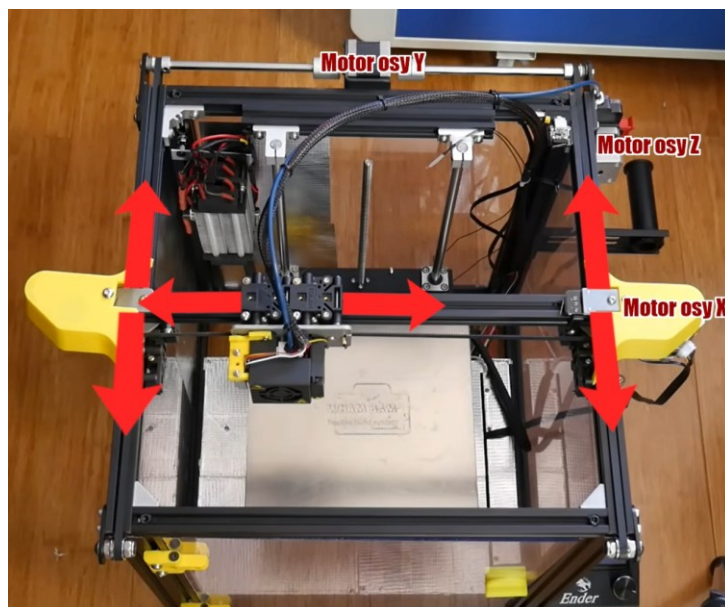


Obrázek 10: Artefakty na testovacím tisku na ose Y tzv. „ghosting“, opakující se obrys písmena Y způsobené rezonancí, kvůli vyšší hmotnosti pohybujících se částí [20]

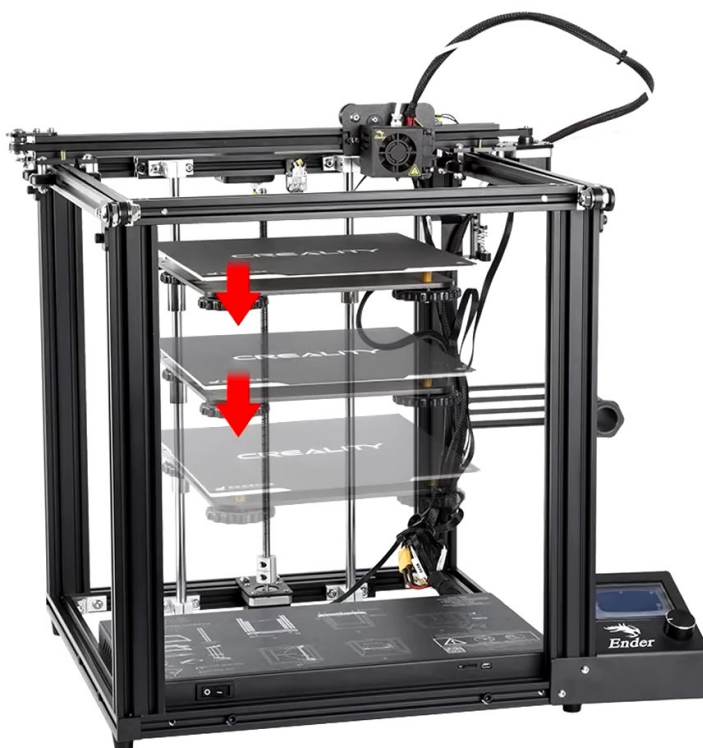
Další nevýhodou je kvůli pohybující se podložce zapotřebí více místa při tisku. Tím pádem v případě uzavření tiskárny musí být samotný kryt také větší, což má za následek nižší teploty při pasivním zahřívání. [21]

3.2.5 XY-Head kartézské 3D tiskárny

Příkladem tohoto typu tiskárny je Ender 5. U té se tisková hlava pohybuje jak ve směru X, tak i Y a pohyb ve směru Z je zajištěn podložkou, která se při tisku pohybuje směrem dolů. Toto je vylepšení designu, protože motor osy Y hýbe menší hmotností.



Obrázek 11: Motory os XY-Head 3D tiskárny Ender 5 [22]

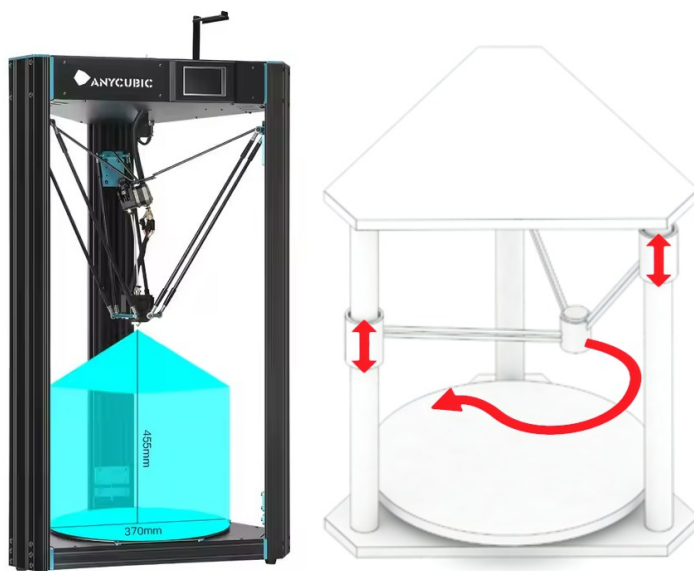


Obrázek 12: Pohyb osy Z XY-Head 3D tiskárny Ender 5 [22]

3.2.6 Delta kartézské 3D tiskárny

Delta tiskárny se od přímočarých kartézských FDM/FFF tiskáren liší pohybovým systémem. Taktéž obsahují minimálně 3 motory, ty však hýbou vertikálně ve věžích 3D tiskárny, na každém pohybu tiskové hlavy tak spolupracují všechny 3 motory, což má za následek vyšší

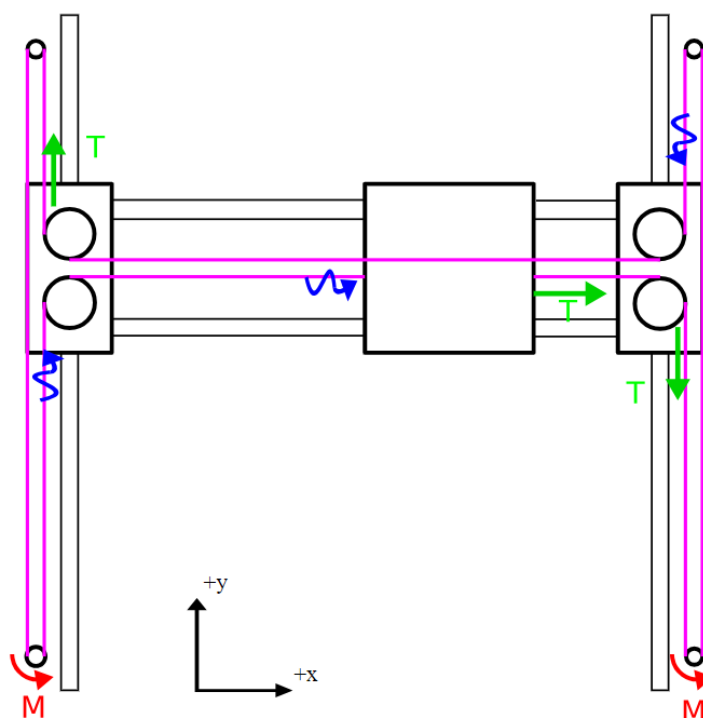
kvalitu tisku. Nevýhodou tohoto systému může být kulatá tisková plocha. Další nevýhodou je neefektivita ve využití vertikálního prostoru, což snižuje výhody uzavření tiskového prostoru z hlediska pasivního zahřívání. Následujícími nevýhodami je složitější vývoj tiskového softwaru a vyšší cena tiskárny. [12, 14]



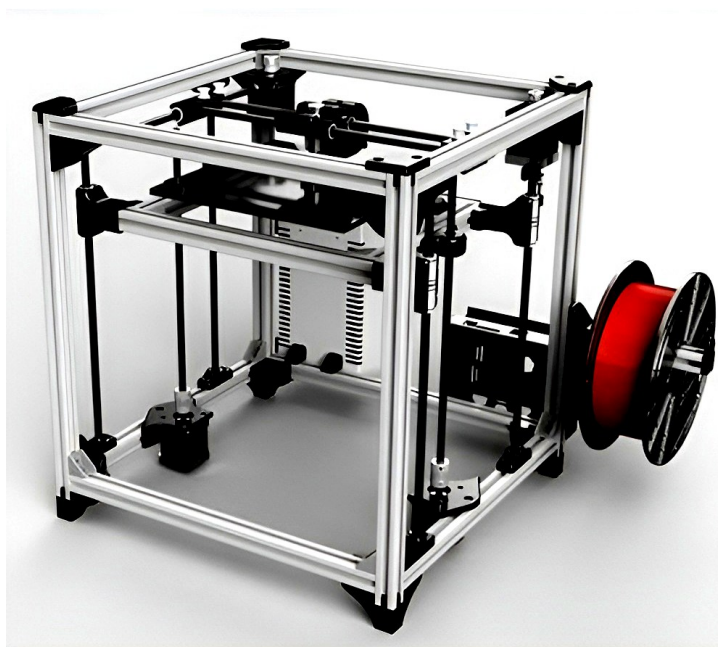
Obrázek 13: Ukázka neefektivity využití vertikálního prostoru a schéma pohybu 3D delta 3D tiskárny [14, 23]

3.2.7 H-Bot kartézské 3D tiskárny

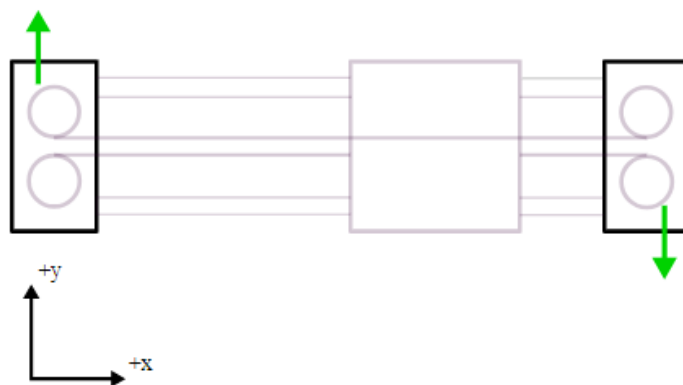
Z mechanického hlediska by se o tomto typu tiskárny by se dalo říci, že se jedná o kombinaci XY-Head a Delta tiskárny. Vzhledově vypadá jako XY-Head a motor(y) osy Z se pohybuje samostatně (viz Obrázek 15 a 16). Avšak Osa X a Y, které pohybují tiskovou hlavou jsou na sobě závislé. Na první pohled se jedná o relativně jednoduchý, elegantní systém. Jak však vidět na kinematice tohoto systému (viz Obrázek 18), tak nevýhodou je, že pohyby síly nepůsobí proti sobě. Což má za následek rotaci konstrukce. Kvůli tomu je potřeba aby řemeny byly velmi napnuté a konstrukce byla velmi pevná. Proto není tento systém pro větší cenu materiálů u 3D tiskáren moc rozšířený. [24]



Obrázek 14: Schématické rozložení XY os H-bot 3D tiskárny [24]



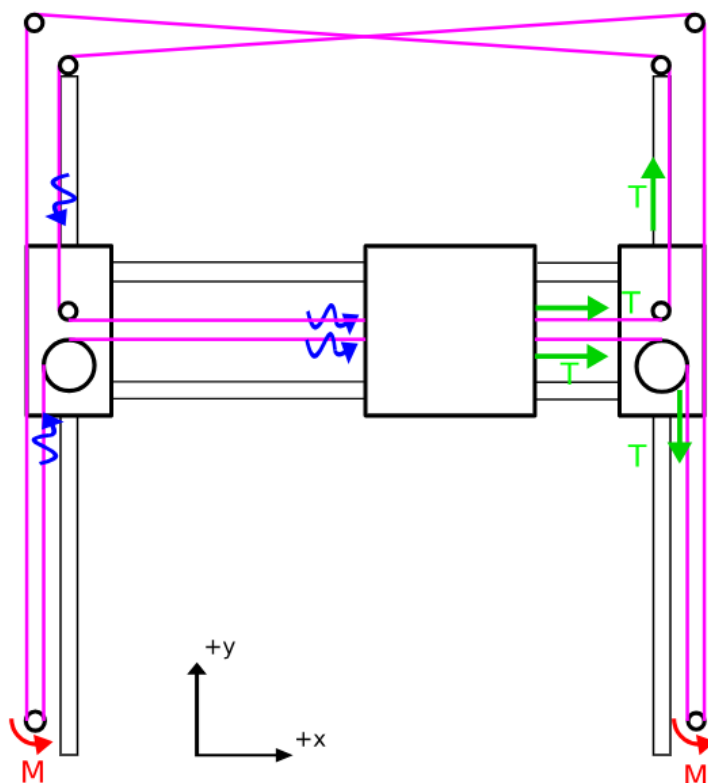
Obrázek 15: H-bot 3D tiskárna [25]



Obrázek 16: Schématické zobrazení působení sil H-Bot 3D tiskárny v osách X a Y
[24]

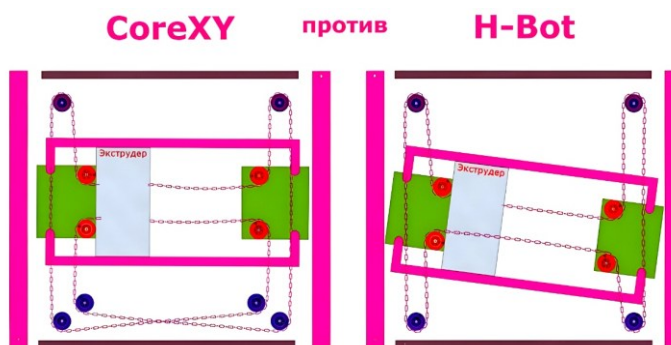
3.2.8 CoreXY kartézské 3D tiskárny

CoreXY velmi podobá H-botu, avšak řeší problém rotace systému po sečtení sil. Jak lze vidět na Obrázku 18, tak síly v ose x působí mnohem přesněji proti sobě. Díky tomuto uspořádání jsou CoreXY tiskárny lehké, rychlé, precizní a mají efektivní využití prostoru při porovnání velikosti tiskárny a objemu tiskového prostoru. Nevýhodou tohoto systému jsou dlouhé řemeny, pomocí kterých motory pohybuji tiskovou hlavou a potřeba relativně velké pevnosti konstrukce ve srovnání s ostatními systémy FDM/FF tiskáren. Konstrukce však nemusí být tak pevná jako u H-bot 3D tiskárny. Další nevýhodou je také relativně složitě programování pohybu hlavy. CoreXY 3D tiskárna je obecně ve srovnání s XZ-Head, XY-Head a Delta 3D tiskárnami dražší, avšak poskytuje nejlepší kvalitu a rychlost tisku. Motory mohou být uloženy mimo tiskový prostor, který může být uzavřený a dosahovat vysokých teplot, díky tomu motory nepotřebují dodatečné chlazení vodou, pokud chce tisknout v prostředí, kde je vysoká okolní teplota. [24]



Obrázek 17: Schématické zobrazení působení sil H-Bot 3D tiskárně v osách X a Y [24]

Na Obrázku 19 lze vidět ukázkou, jak by se tisková hlava pohybovala nebýt postranních kolejnic. Nejedná se o přesné znázornění tiskáren, ve skutečnosti by i řemeny byly více napnuté. Jedná se pouze o ukázkou o tendenci sil u H-Botu způsobovat rotaci systému. Toto je nepatrné u malých rychlostí, avšak při vyšších tiskových rychlostech jsou nároky pro pevnost rámu ve srovnání s CoreXY vyšší pro dosažení přesného tisku. [24, 26]



Obrázek 18: Rotace systému způsobená působícími silami rozložení CoreXY a H-Bot [26]

3.2.9 Scara 3D tiskárny

Tyto tiskárny v podstatě používají robotickou ruku, to se může hodit pro specifické aplikace, běžně se však nepoužívá. Jedním příkladem je tisknutí keramiky, kdy je keramická hlína vytlačována na jednotlivé vrstvy pomocí válce, podobně jako injekční stříkačkou (viz obrázek 25). [27, 28]



Obrázek 19: 3D tisk za pomoci robotické ruky SCARA [28]

3.2.10 3D tiskárny Polar

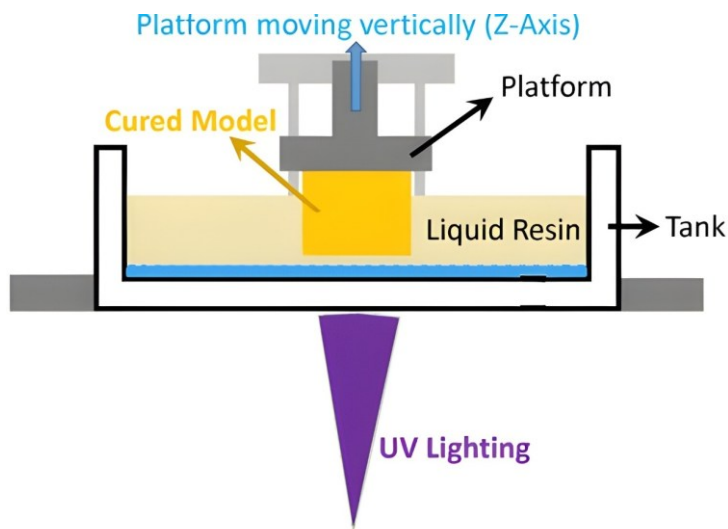
Tyto tiskárny pracují v polárním souřadnicovém systému, nikoliv kartézském. To znamená, že je založena na bodech uložených v oblouku, nikoliv v pravoúhlém souřadnicovém systému. Pracovní plocha se u této tiskárny otáčí, díky tomu, se tisková hlava pohybuje jenom nahoru a dolů a dopředu a dozadu. Také umožňuje mít velkou tiskovou plochu. Navíc tyto tiskárny mají velice lehký rám. Tento typ se stále vyvíjí a jejich nevýhodami je, že tyto tiskárny jsou drahé a servis je pro ně málo dostupný. Tento systém nemá rovnoměrné rozlišení. A je potřeba velkého zrychlení, když například hrana tisknouce se krychle prochází středem podložky, na kterém je tisk umístěn, podložka se tak musí rychle se otočit, aby udělala 90° zatáčku, nebo se hodně zpomalit. Navíc ji postihuje stejný problém jako u Head-XY (Bed Slinger) tiskárny, kdy motor rotující podložkou musí hýbat poměrně velkou hmotností, což má za následek nepřesnosti v tisku. [14]



Obrázek 20: 3D tiskárna typu Polar [14]

3.3 Pryskyřicové fotopolymerné 3D tiskárny

Stejně jako u FDM/FFF tiskáren se fyzický objekt vytváří nanášením jednotlivých vrstev na sebe. Na rozdíl však od nanášení roztaveného materiálu, je monomerní pryskyřice vytvrzována světlem o specifické vlnové délce, které způsobuje polymerizaci monomeru. V naprosté většině případů se jedná o ultrafialové záření. Tato technologie zpravidla dosahuje mnohem přesnější definice tištěného objektu oproti FDM/FFF tiskárnám. Její nevýhoda je však zvýšený nárok na zdravotní ochranu při jejím používání. S monomerní pryskyřicí je potřeba pracovat v dobře větraném prostředí, nebo nosit respirátor, kvůli těkavosti toxických látek, které obsahuje. Dále je potřeba nosit nitrilové rukavice a dbát zvýšené opatrnosti, aby monomerní pryskyřice neunikla do pracovního prostředí. Tato technologie je i relativně citlivá na použití správné teploty tisku. Při selhání tisku je resetování relativně zdlouhavý a pracný proces, kdy zbylou pryskyřicí je potřeba vylít z nádrže (viz Obrázek 22) a očistit vytvrzenou pryskyřici z fólie, která se nachází nad zdrojem UV záření. Dále se doporučuje použitou zbylou pryskyřicí přefiltrovat, protože by polymerizované kusy monomeru mohli vést k selhání dalšího tisku a poškození tiskárny, kdyby byly přitlačeny mezi podložku a sklo, které se nachází nad UV světlem. [11, 14]



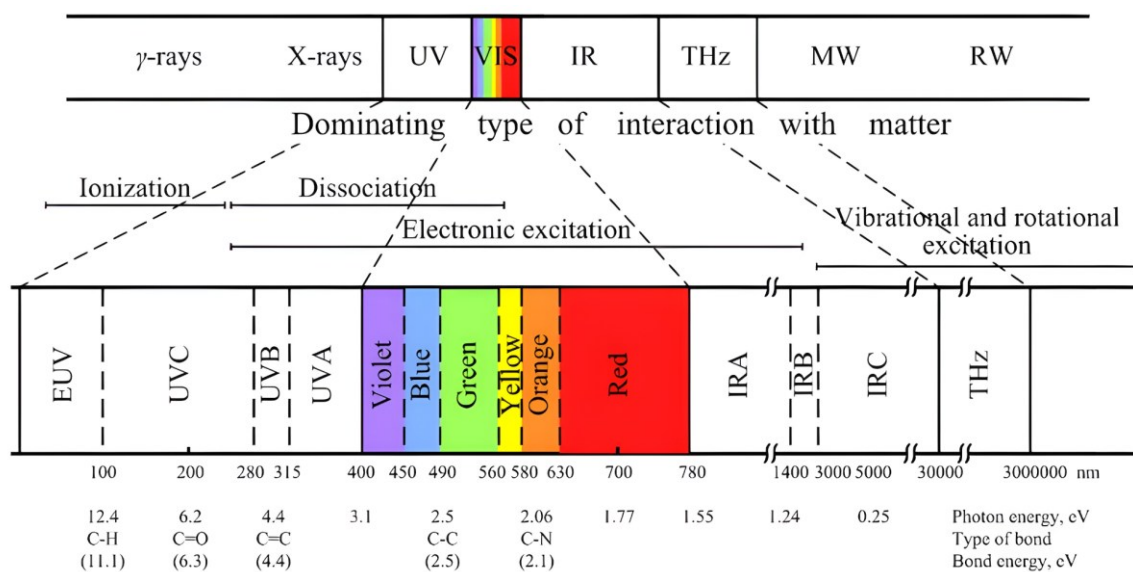
Obrázek 21: Schéma typické fotopolymerizační tiskárny [29]

Po vytištění je výrobek pokryt pryskyřicí, ve která byl ponořen. Ta se obvykle čistí ponořením výrobku do nádrže s isopropyl alkoholem, nebo jinou kapalinou, ve které je monomerní pryskyřice rozpustná. Některé druhy pryskyřic jsou rozpustné i ve vodě. To však neznamená, že díl lze umýt v obyčejném umyvadle a nasyceného rozpouštědla je potřeba se zodpovědně zbavit. Například některé recyklační centra přijímají některé druhy rozpouštědel, i když jsou kontaminované monomerní pryskyřicí. Další možností je nechat rozpouštědlo odpařit a zbylou pryskyřici v nádobě vyhodit do koše. Očištěný díl je po výtisku stále relativně měkký a je potřeba ho dotvrdit na UV světle. K rovnoměrnému dotvrzení je ideální použít uzavřený reflektivní prostor se zdrojem UV světla o správné vlnové délce, typicky 365-405 nm (tzv. UV-A). Další možností je položení vytištěného výrobku na světlo slunce, toto však trvá značně delší dobu a má další nevýhody. Kvůli jednostrannému působení záření na slunci, má díl tendenci vytvrzovat nerovnoměrně, což vede k ohnutí dílce, pokud ho často neotáčíme. Dále sluneční záření obsahuje i více energetické záření, které polymer degraduje, což má za následek křehnutí a žloutnutí materiálu. Další možností je použití levné UV baterky, toto však je velmi zdlouhavé. [11, 30, 31]

Tabulka 1 Přibližná doba vyvozování výtisku v závislosti na použití zdroje UV záření [31]

Velikost vytisknutého výrobku	Vytvrzovací stanice	UV lampa pro vytvrzování gelových nechtů	Sluneční světlo
Miniatura	1-2 min	1-2 min	2-3 h
Střední velikost	3-5 min	3-5 min	

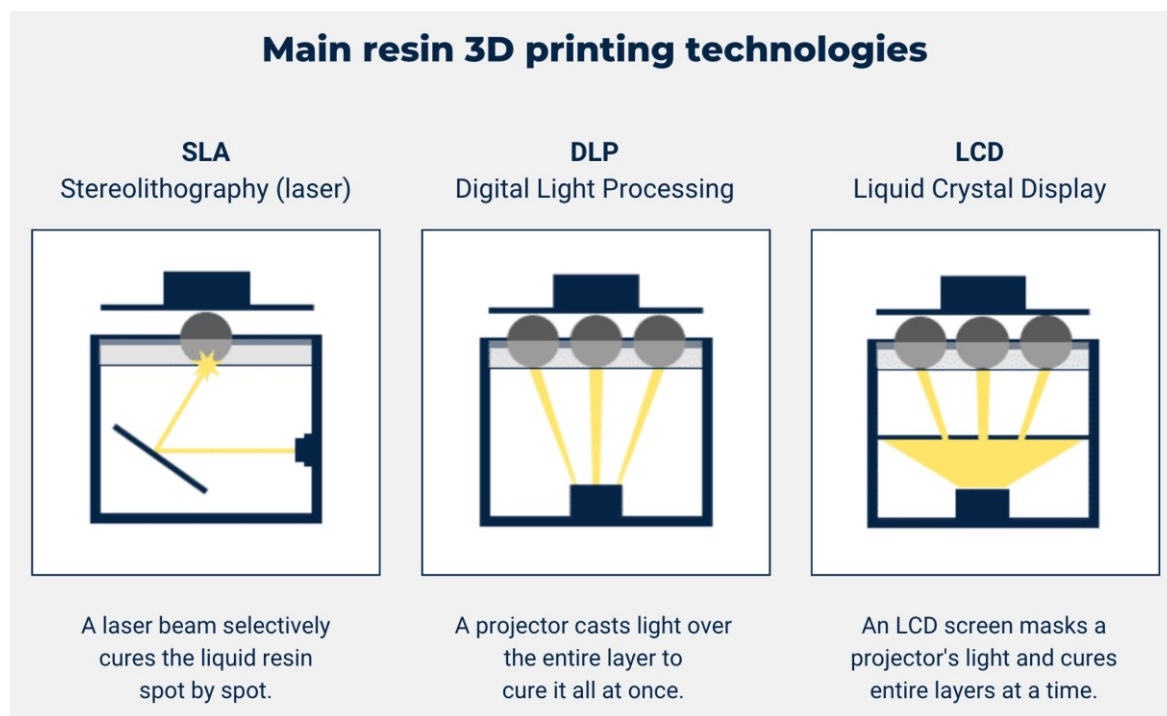
Velká velikost	5-10 min	5-10 min	10 h
----------------	----------	----------	------



Obrázek 22: Spektrum elektromagnetického záření (světla) [32]

3.4 Dělení fotopolymerizačních tiskáren

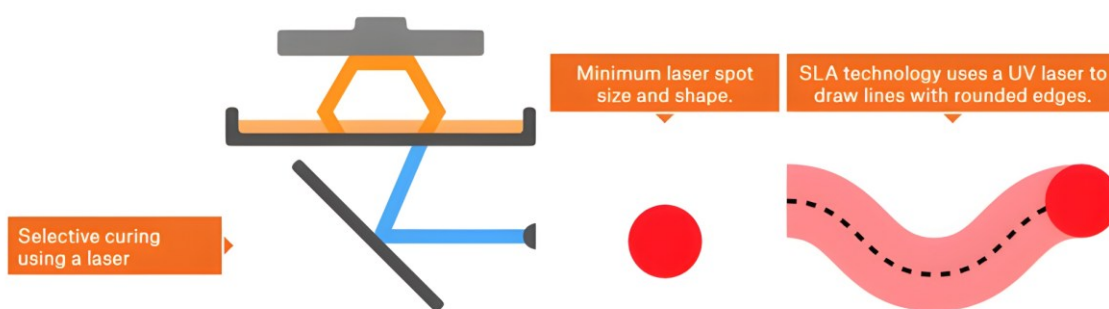
Fotopolymerizační tiskárny se dělí podle způsobu projekce UV světla pro vytvoření objektu o požadovaném tvaru. [11, 14, 33]



Obrázek 23: SLA, DLP a LCD fotopolymerizační 3D tiskárny [33]

3.4.1 SLA pryskyřicové fotopolymerizační 3D tiskárny

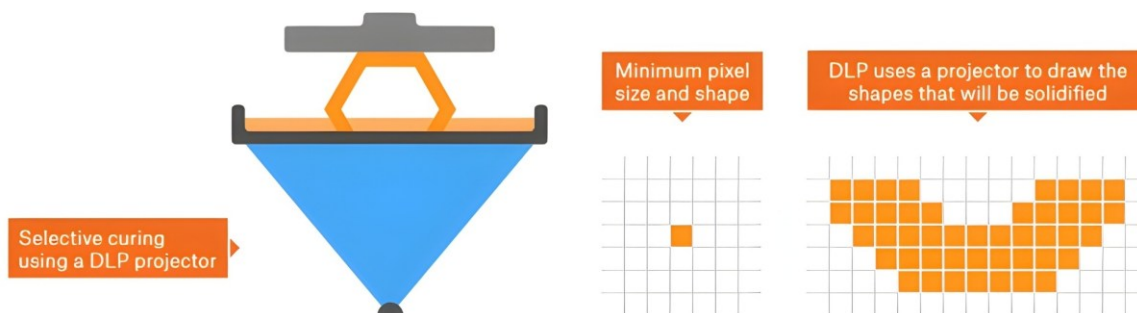
SLA neboli stereolitografie, je aditivní výrobní proces, při kterém je monomerní pryskyřice vytvrzována pomocí UV laseru. Pro vytvrzení požadovaného tvaru jednotlivé vrstvy je paprsek laseru precizně ovládán pomocí zrcadla. Laser tak „vykresluje“ každou vrstvu, což znamená, že čím je plocha vrstvy větší, tak tím delší je její proces vytvrzování. Další nevýhodou je vyšší cena ve srovnání s ostatními pryskyřicovými fotopolymerizační tiskárnami. Výhodou této technologie je vysoká přesnost vytištěných dílů, obzvláště znatelná při tisku křivek. [12, 14, 34]



Obrázek 24: SLA 3D tiskárna [14]

3.4.2 DLP pryskyřicové fotopolymerizační 3D tiskárny

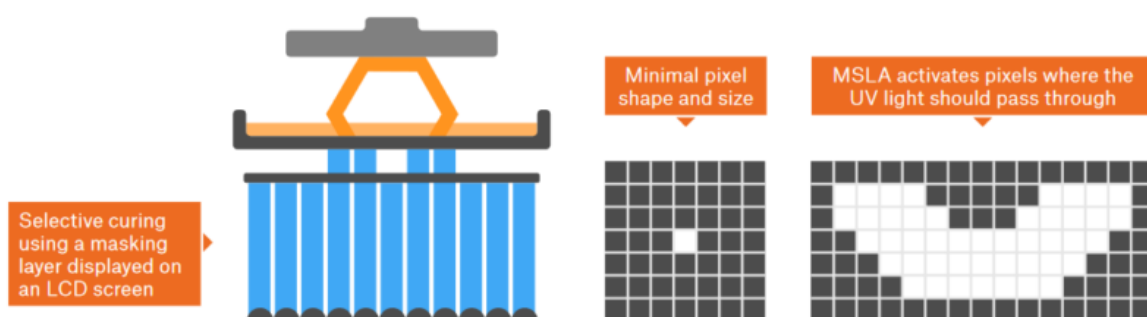
DLP je zkratkou pro Direct/digital Light Processing. Tyto tiskárny používají digitální projektor jako zdroj UV světla. Výhodou této technologie je, že je celá tištěná vrstva ozařována najednou a UV světlo je na ni přesně zaostřeno. To má za následek rychlý tisk a přesné hrany. Nevýhodami je větší cena tiskárny a rozlišení, které je omezeno DLP projektorem. [12, 14, 34]



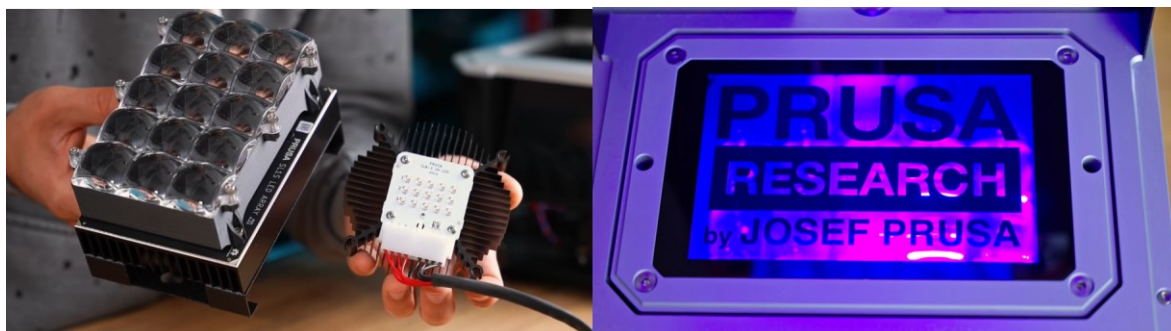
Obrázek 25: DLP 3D tiskárna [14]

3.4.3 MSLA / LCD pryskyřicové fotopolymerizační 3D tiskárny

Maskovaná stereolitografie používá UV světlo o velké ploše, které je pro dosažení požadovaného tvaru maskováno LCD displejem. Stejně jako DLP technologie je doba vřazování stejně rychlá nezávisle na velikosti její plochy. Ve srovnání s DLP je však jednodušší pro výrobu a seřízení, což má za následek nižší cenu. Zatímco většina DLP projektorů je omezena na 4K rozlišení, tak MSLA tiskárny často poskytují 8K rozlišení. Nevýhodou je, že sice LCD display promítá ostrý obraz na povrch, ale ztrácí nějakou přesnost, jak světlo cestuje pár milimetrů, než dosáhne pryskyřice. [12, 14, 34]



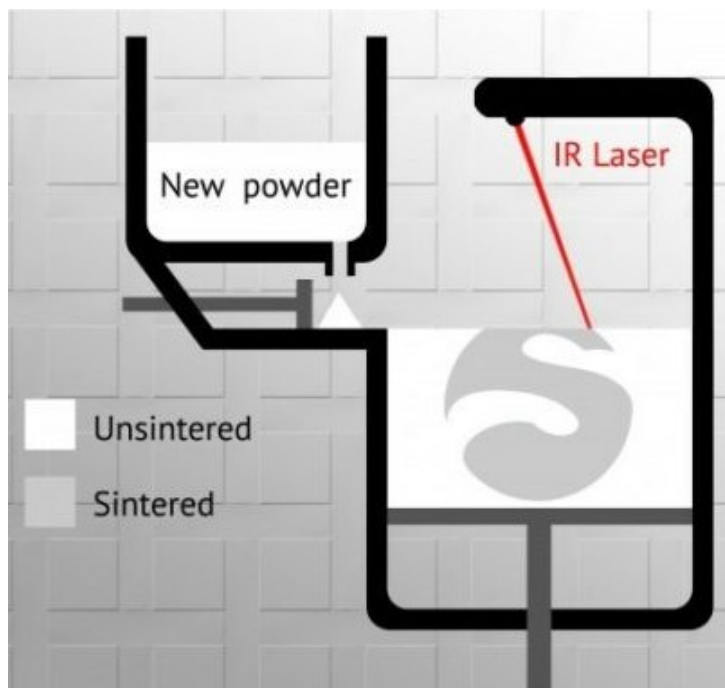
Obrázek 26: MSLA 3D tiskárna [34]



Obrázek 27: Zdroj UV světla a LCD displej u MSLA 3D tiskárny [34]

3.5 SLS Selektivní Laserové Spékání

SLS 3D tiskárny využívají selektivní spékání práškového materiálu laserem po vrstvách nanášených válečkem, nespečený prášek slouží jako podpora a je částečně recyklovatelný. Vytisknuté díly jsou velmi přesné a mají výborné mechanické vlastnosti. Technologie je cenově i provozně náročná, což obecně omezuje její dostupnost na průmyslový sektor.



Obrázek 28: SLS 3D tiskárna [14]

3.6 Shrnutí 3D tiskových technologií

Technologie 3D tisky se dají pro lepší přehlednost shrnout do tabulky.

Tabulka 2 Shrnutí 3D tiskových technologií [12, 14]

Typ technologie	Princip	Výhody	Nevýhody
FDM	Tavení a vrstvení filamentu pomocí trysky	Jednoduchá údržba, nízké provozní náklady	Nízká přesnost, vrstvený vzhled
Fotopolymerizační	Vytvrzování tekuté pryskyřice UV světlem	Vysoká přesnost, hladký povrch	Náročnější údržba, zdravotní rizika, vyšší provozní náklady
SLS	Spékání práškového materiálu laserem	Pevné a funkční výtisky bez podpěr	Vysoká cena zařízení, prašnost

II PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH SMĚSI A VOLBA MATERIÁLŮ

Byl stanoven cílový elektrický odpor antistatické podešve a byly vybrány materiály pro výrobu podešve, ze kterých byly vyrobeny zkušební vzorky. Pomocí měření rezistivity se stanovoval perkolační práh a byla vybrána nejvhodnější receptura pro výrobu antistatické podešve.

4.1 Stanovení cílového odporu podešve

Rozsah elektrického odporu samotné antistatické podešve není v normách stanoven jako samostatná hodnota, protože se hodnotí obuv jako funkční celek. Elektrický odpor celé obuvi je ovlivněn nejen podešví, ale i stélkou, podšívkou a kontaktem s chodidlem. Z tohoto důvodu musí být odpor samotné podešve dostatečně nízký, aby odpor celé obuvi spadl do rozsahu 0,1–1 000 M Ω podle normy ČSN EN ISO 20345. Cílený rozsah odporu antistatické podešve byl tak stanoven do 10 M Ω . [1]

4.2 Výběr matrice a vodivého plniva

Pro výrobu antistatické pryže byly vytipovány 3 druhy polyuretanů, 3 typy sazí a amoniová sůl.

4.2.1 PUR 400 od firmy Dawex Chemical

PUR 400 je dvousložkový, bezrozpuštědlový, tekutý polyuretanový systém, transparentní, pružný a UV stabilní. [35]

Tabulka 3 Vlastnosti PUR 400 – Dawex Chemical [36]

Cena za 1 kg	1 615 Kč
Hustota směsi	1,1 g/cm ³
Mísící poměr	100 : 100 (hmotnostní)
Tvrdost	70 - 75 shore A
Zpracovatelnost	5 - 6 minut (200 g, 23 °C)
Vytvrzení	Cca 5 hodin (200 g, 23 °C)
Pevnost v tahu	5 MPa
Prodloužení do přetržení	34%



Obrázek 29: PUR 400 od firmy Dawex Chemical [36]

Z namíchaných vzorků bylo u tohoto polyuretanu bylo zjištěno, že má teplotu skelného přechodu kolem 40 °C, a tak pro výrobu antistatické podešve nebyl použit.

4.2.2 GAFORM E70 – Dawex Chemical

Pružný dvousložkový polyuretanový licí systém – velmi houževnatý, odolný proti přetržení nebo poškození, dobrá chemická odolnost a odolnost proti abrazi. [37]

Tabulka 4 Vlastnosti GAFORM E70 – Dawex Chemical [37]

Cena za 1 kg	482 Kč
Hustota směsi	1,07 g/cm ³
Mísící poměr	100:65 (hmotnostní A:B)
Tvrдость	70 (+- 4) shore A
Zpracovatelnost	10 - 20 minut při 25 °C (200 g)
Vytvrzení	24 hodin při 25 °C (nebo 4- 6 hodin při 70 °C)
Pevnost v tahu	13 MPa
Prodloužení do přetržení	900%



Obrázek 30: GAFORM E70 od firmy Dawex Chemical [37]

4.2.3 GAFORM E45 – Dawex Chemical

Dvousložkový elastický polyuretanový lící systém – velmi houževnatý, s vysokou odolností proti přetržení a mechanickému poškození. Dobrá odolnost vůči chemikáliím a abrazi. [38]

Tabulka 5 Vlastnosti GAFORM E45 – Dawex Chemical [38]

Cena za 1 kg	482 Kč
Hustota směsi	1,05 g/cm ³
Mísící poměr	100:100 (hmotnostní A:B)
Tvrdość	45 (+ 5) Shore A
Zpracovatelnost	10 - 20 minut při 25 °C (200 g)
Vytvrzení	24 hodin při 25 °C (nebo 4- 6 hodin při 70 °C)
Pevnost v tahu	7 Mpa
Prodloužení do přetržení	1800%



Obrázek 31: GAFORM E45 od firmy Dawex Chemical [38]

4.2.4 Vybraná vodivá plniva

Pro dosažení vodivosti pryže bylo experimentováno s příměsí následujících materiálů:

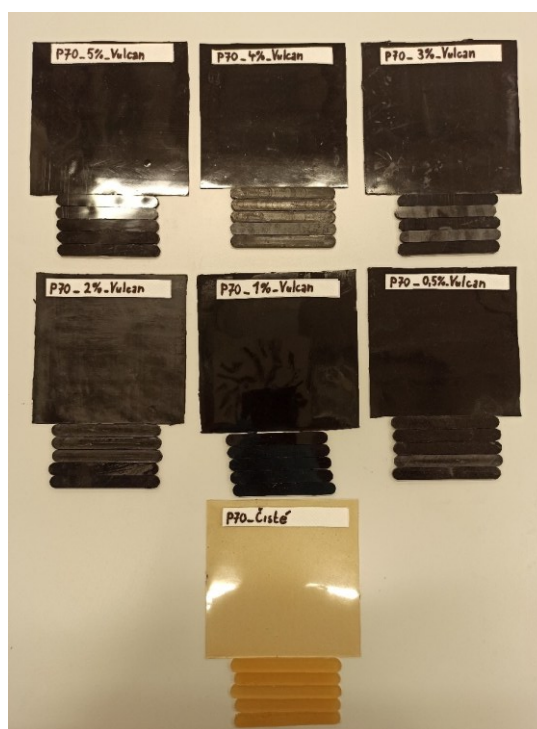
- Saze Cabot Vulcan XC72R
- Saze CHEZACARB AC
- Karbonové nanotrubky
- Amoniová sůl

4.3 Výroba zkušebních vzorků pro test rezistivity

Pro test rezistivity bylo vyrobeno celkem 16 destiček o rozměrech 150x150 mm a tloušťce 1 mm. Směs byla míchána pomocí laboratorní míchačky po dobu 5-8 minut. Při koncentraci

přímě do 4 hm.% se jako nejefektivnější ukázalo její vmíchání pouze do jedné složky polyuretanu, přičemž druhá složka byla přidána následně. Při koncentraci nad 4 hm% se kvůli nárustu viskozity směsi osvědčilo vmíchání příměsi do obou složek současně. Bylo experimentováno ředěním směsi acetonem s cílem snížit viskozitu, ale to nevedlo k využitelným výsledkům, protože se aceton po vmíchání nedařilo dostatečně odstranit a zhoršoval mechanické vlastnosti výsledného materiálu.

Aby mohla být odlitá destička vyjmuta z formy tak byla použita PET fólie natřená Lukopren Parafinovým Separátorem. Separátor však zůstával na odlitku, a i po jeho snaze ho ze vzorku očistit docházelo k ovlivnění vodivosti materiálů. Nakonec byla použita teflonová folie, na kterou již separátor nebylo potřeba použít.



Obrázek 32: Ukázka části odlitých vzorků pro test rezistivity

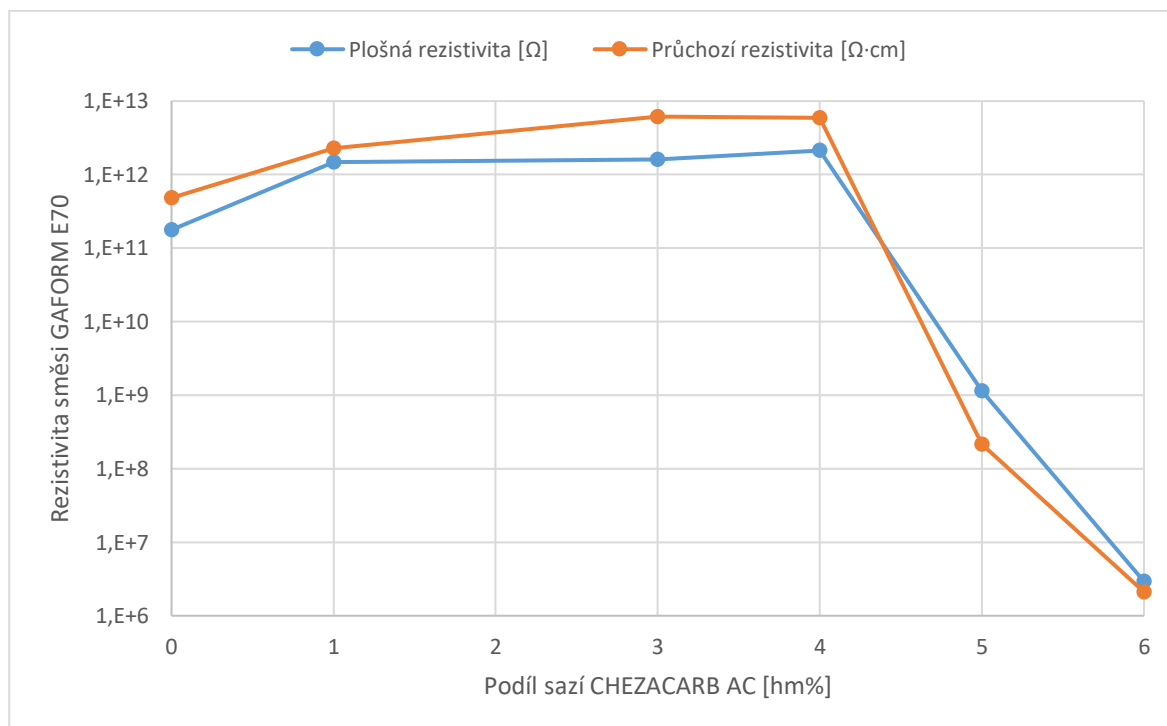
4.4 Měření rezistivity a stanovení perkolačního prahu

Pro měření povrchové a objemové rezistivity byl použit TeraOhmmetr Warmbier MetrISO 3000.



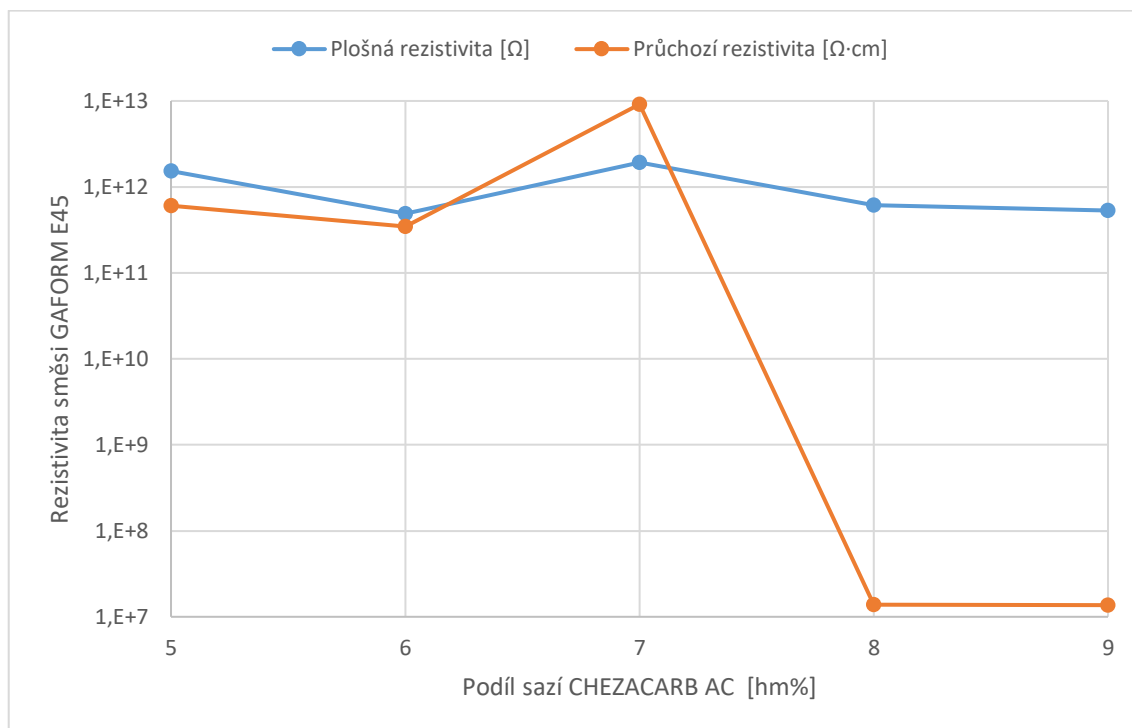
Obrázek 33: TeraOhmmetr Warmbier MetrISO 3000 zapojený pro měření objemové rezistivity

Dosáhnout perkolačního prahu jak u objemové, tak i plošné rezistivity se podařilo dosáhnout kombinací směsí polyuretanu GAFORM E70 a sazí CHEZACARB AC. Tloušťka měřeného vzorku byla měřena na čtyřech místech a rezistivita měřena na třech místech. Průměrné hodnoty jsou zobrazeny v grafu 1 a 2.



Graf 1: Plošná [Ω] a průchozí [$\Omega \cdot \text{cm}$] rezistivita polyuretanu GAFORM E70 v závislosti na podílu sazí CHEZACARB AC [hm%]

Jak lze vidět na Grafu 1, tak při podílu sazí CHEZACARB AC 0–4 hm% nedochází k žádné významné změně v rezistivitě materiálu, při 5 hm% však objemová a povrchová rezistivita klesá o čtyři řády a při 6 hm% klesá o další dva. Z tohoto grafu lze vyvodit, že perkolační práh je přibližně při koncentraci 5,5 hm%.



Graf 2: Plošná [Ω] a průchozí [$\Omega \cdot \text{cm}$] rezistivita polyuretanu GAFORM E45 v závislosti na podílu sazí CHEZACARB AC [hm%]

Na Grafu 2 lze pozorovat, že perkolační práh pro objemovou rezistivitu se nachází přibližně při koncentraci sazí 7,5 hm%. Přítomnost tohoto perkolačního prahu však byla způsobena prouděním elektrického proudu stlačeným materiálem, když byla horní sonda měřicí přístroje odlehčena, tak aby se stále dotýkala měřeného povrchu, tak rezistivita vzrostla o pět řádů. Toto je důvod proč u povrchové rezistivity není perkolační práh znatelný ani u 9 hm% sazí. Toto měření také ukázalo, že vodivost je velmi závislá na zvolené matrici, i přesto, že oba materiály byly polyuretany, tak se perkolačního prahu se podařilo dosáhnout pouze u tužšího polyuretanu GAFORM E70. Použití směsi pro výrobu podešve s podílem sazí nad 7 hm% není praktické, protože směs při této koncentraci je příliš viskózní.

5 TVORBA PODEŠVE A ODLÉVACÍ FORMY

Na základě individuálního tvaru chodidel bylo vytvořeno obuvnické kopyto, podle něhož vytvořen svršek i podešev obuvi.

5.1 Konstrukce obuvnického kopyta

Nejprve byl vytvořen 3D model kopyta odpovídající tvaru chodidel, který byl následně vytištěn na 3D tiskárně.

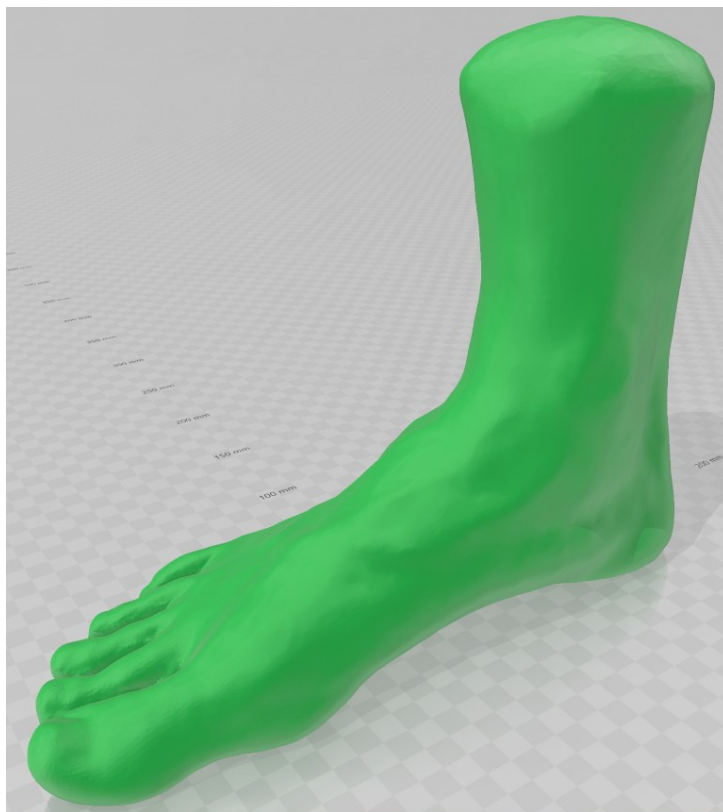
5.1.1 Tvorba 3D modelu obuvnického kopyta

Pro vytvoření kopyta byly vytvořeny 3D skeny mých noh pomocí 3D skeneru Tiger od firmy Materialise NV.

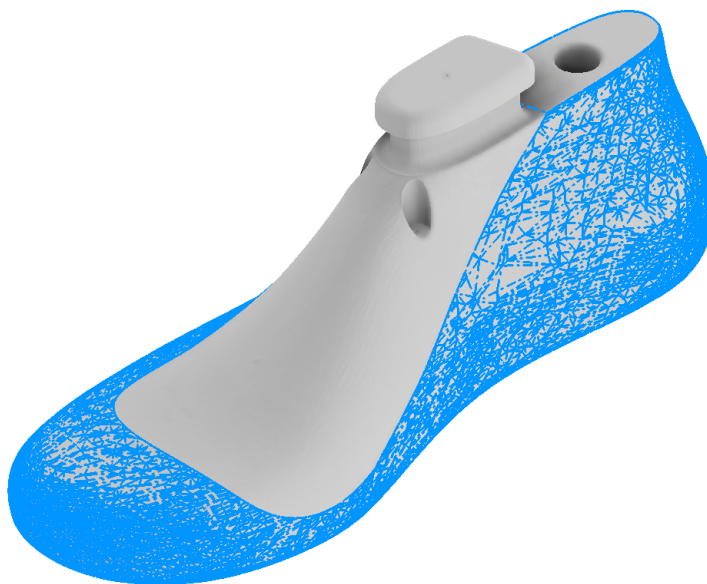


Obrázek 34: 3D skener Tiger od firmy Materialise NV [39]

Skeny byly vyhlazeny v programu Zbrush a pan doktor Tomáš Sáha podle nich vytvořil obuvnické kopyto v programu GP Manager v7 – GP FussMess. Kopyto pak mnou bylo dodatečně upraveno, tak aby přesně pasovalo na moji nohu. Kopyto bylo vloženo do programu Inventor a rozděleno na dvě části. Dále byly přidány otvory pro šrouby a úchyt pro vytažení jazyka (menší části) kopyta po upnutí svršku. Jelikož byly moje chodidla velmi velikostně podobné, tak druhé kopyto bylo vytvořeno zrcadlením.



Obrázek 35: Vyhlazený sken chodila



Obrázek 36: Upravené obuvnické kopyto

5.1.2 Tisk a sestavení obuvnického kopyta

Jelikož se na obuvnické kopyto při tvorbě svršku dávala teplem tvarovatelná tužinka, tak bylo důležité, materiál, ze kterého byl vyroben teple odolal. Pro tisk byl původně zvolen materiál PET-G, avšak kvůli dostupnosti byl použit materiál CPE HG100.



Obrázek 37: Cívka filamentu CPE HG100

Z tohoto materiálu se úspěšně podařilo vytisknout jazyky kopyta, avšak tisk hlavní části obuvnického kopyta celkem 4x selhal odlepením od podložky. Toto bylo pravděpodobně způsobeno tím, že filamenty nebyly koupeny nové a měli v sobě velký podíl vlhkosti. Toto se nejspíše dalo vyřešit vysušením filamentu, avšak místo toho byl použit nově koupený PET-G filament, ze kterého se již podařilo vytisknout na první pokus. Pro tisk jazyka byla použita 100% výplň a pro kopyto byly nastaveny tloušťky stěn na 1 cm a 10% výplň gyroid. Části kopyta pak byly zbroušeny a sešroubovány k sobě.



Obrázek 38: Nepovedené výtisky



Obrázek 39: Dokončené obuvnické kopyto

5.2 Návrh a tisk podešve

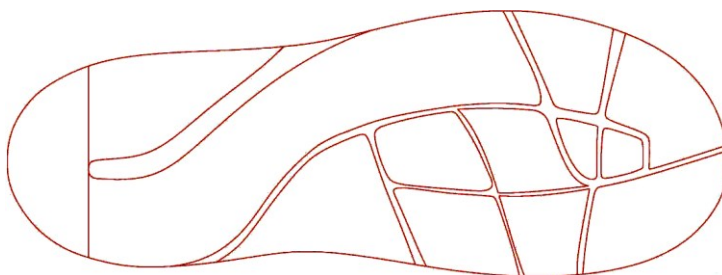
Podle tvaru obuvnického kopyta byl nejdříve vytvořený návrh obuvi ve 2D, ze kterého byl následně vytvořen 3D model a byl vytištěn na 3D tiskárně.

5.2.1 Vytvoření designu ve 2D

Na základě modelu obuvnického kopyta byly ve spolupráci se studentem Vítem Šimonem Andráškem z FMK UTB vytvořeny návrhy svršku a podešve v programu Rhinoceros.



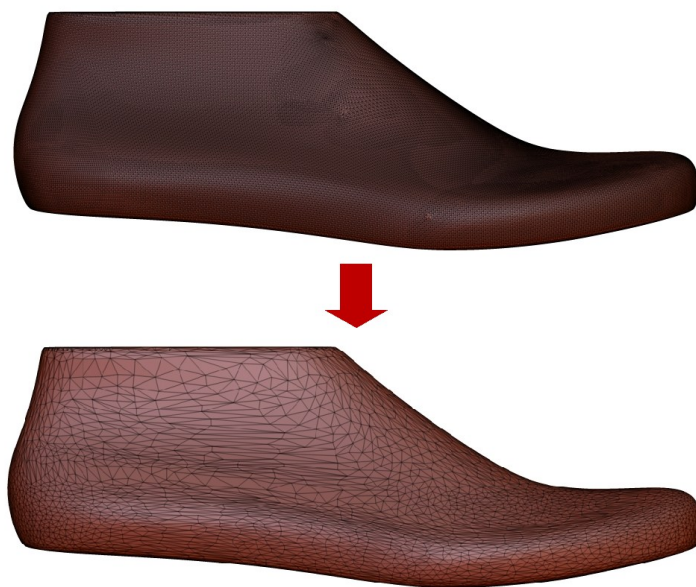
Obrázek 40: Boční 2D design obuvi



Obrázek 41: Design dezénu podešve

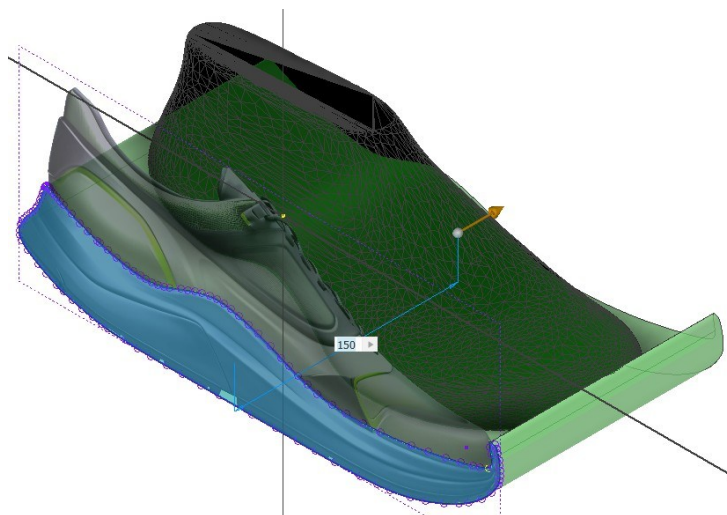
5.2.2 Tvorba 3D modelu podešve

Protože byl na kopyto napínán o svršek o tloušťce 2 mm, tak byl 3D model kopyta zvětšen pomocí funkce inflate v aplikaci Zbrush. Dále byl model kopyta dodatečně vyhlazen a jeho geometrie zjednodušena, aby model kladl menší nároky na výkon počítače.



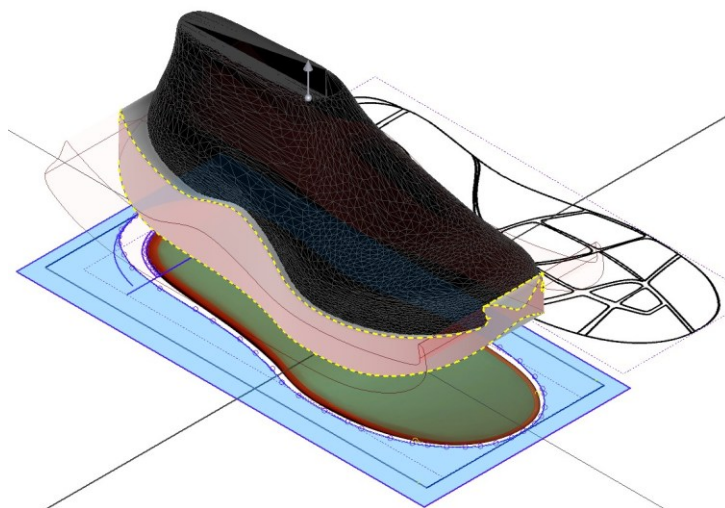
Obrázek 42: Zjednodušení geometrie kopyta

Následně byla síť modelu otevřena v programu Inventor a převedena na tzv. objemové těleso, které umožňuje v tomto programu další úpravy. Poté bylo kopyto rotováno tak, aby bylo přesně v pozici náslapu relativně k vodorovné ploše XY. Pak byla vytvořena pracovní plocha z boku kopyt a na ni vložen 2D boty tak, aby pasoval na kopyto. Následně byl obkreslen obrys podešve, který byl vysunut jako nové těleso.



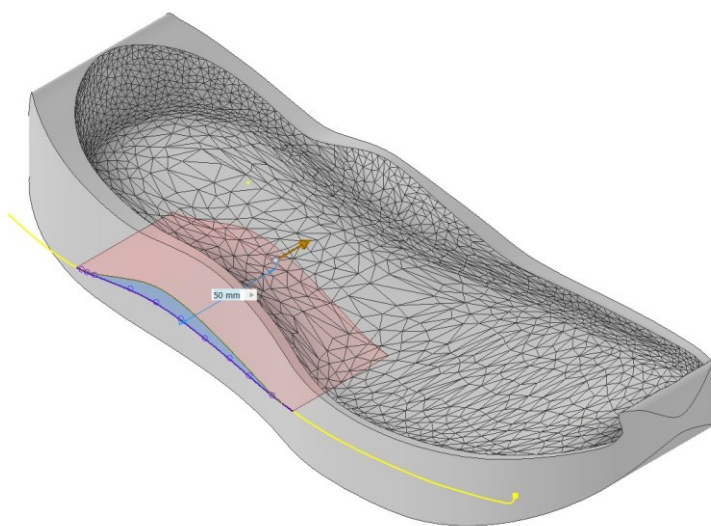
Obrázek 43: Vysunutí obrysu kopyta jako nové těleso

Podobným způsobem byl přebytečný materiál odebrán odečtením vysunutého obrysu z horizontální pracovní plochy.



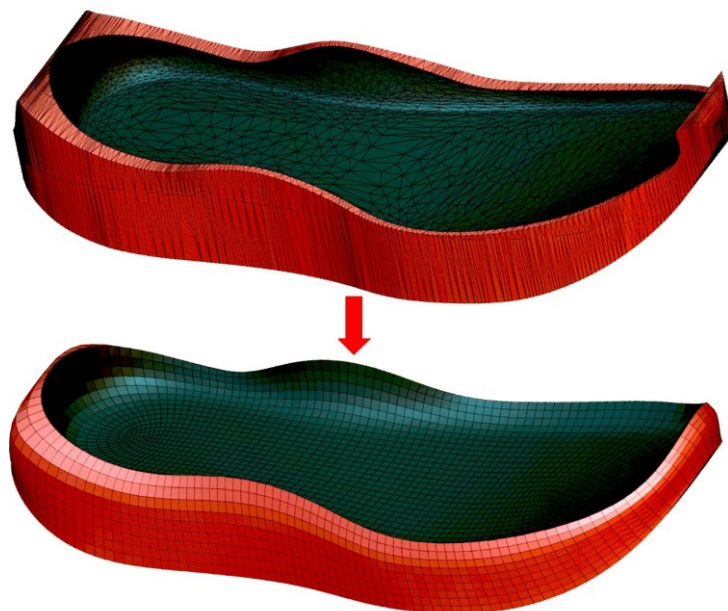
Obrázek 44: Odečení vysunutého obrysu z horizontální pracovní plochy

V posledním kroku programu Inventor byl odečten model kopyta od podešve a zmenšeno vnější boční vyvýšení.



Obrázek 45: Dodatečné tvarování podešve v program Inventor

Dále v programu Zbrush byly vytvořeny 3 skupiny polygonů vnitřní část, spodní strana a boční strany. Tyto skupiny polygonů lze zobrazit jako barevné plochy. Skupiny polygonů byly důležité pro vytvoření ostrých hran v místech, kde se skupiny setkávají a zjednoduší maskování při další práci na podešvi. Následně pomocí funkcí „Tessimate“, „Zremesher“ a vyhlazovacího štětce byla síť 3D modelu optimalizována.



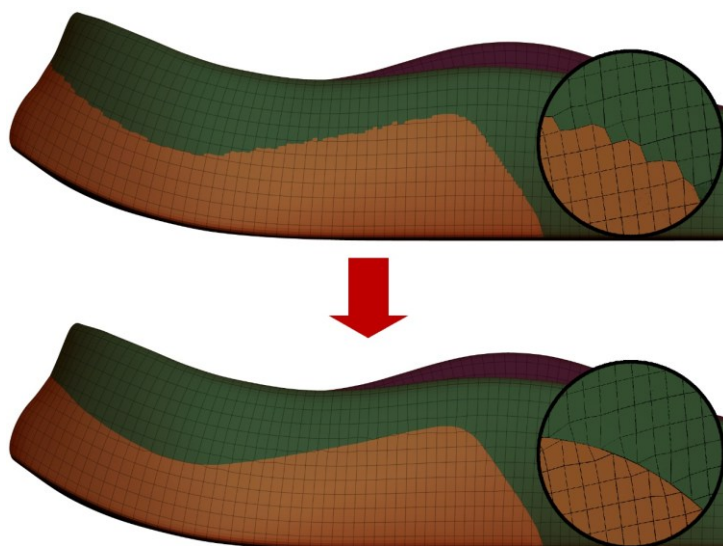
Obrázek 46: Optimalizace sítě

Sít' byla účelně optimalizována tak, aby nebyla příliš hustá pro jednodušší vytváření hrubého tvaru podešve. Po vytvarování přibližného tvaru podešve bylo do prostředí vloženo kopyto a podle něj co nejpřesněji napasována podešev.



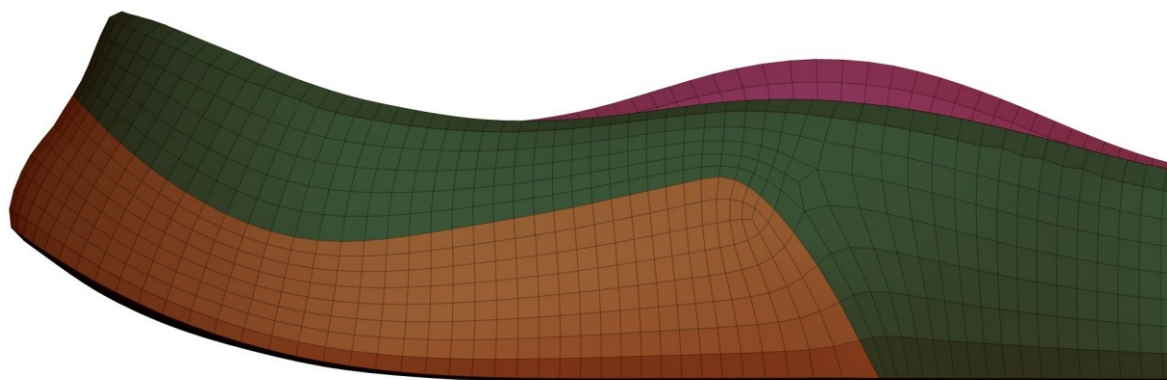
Obrázek 47: Hrubý tvar podešve

Pak bylo zvýšeno rozlišení modelu do několika tzv. Dynamic Subdivision, to umožňovalo přepínat mezi vyšším a nižším rozlišením modelu, kdy vyšší rozlišení bylo nezbytné pro vymodelování detailů. Podle 2D návrhu boty pak byla v patní část vytvořena další skupina polygonů a pomocí vyhlazovacího štětce s režimem Weighted Smooth Mode: Group Border, byla vyhlazena.



Obrázek 48: Vyhlazení hranice mezi skupinami polygonů

Následně byl model uložen do historie a pomocí funkce Zremesher byla optimalizována síť modelu tak, aby jednotlivé polygony byly rovnoběžné s hranou mezi dvěma upravovanými skupinami polygonů, potom byla promítnuta uložená historie, aby se model co nejvíce přiblížil původnímu tvaru.



Obrázek 49: Polygony rovnoběžné s hranou mezi skupinami polygonů

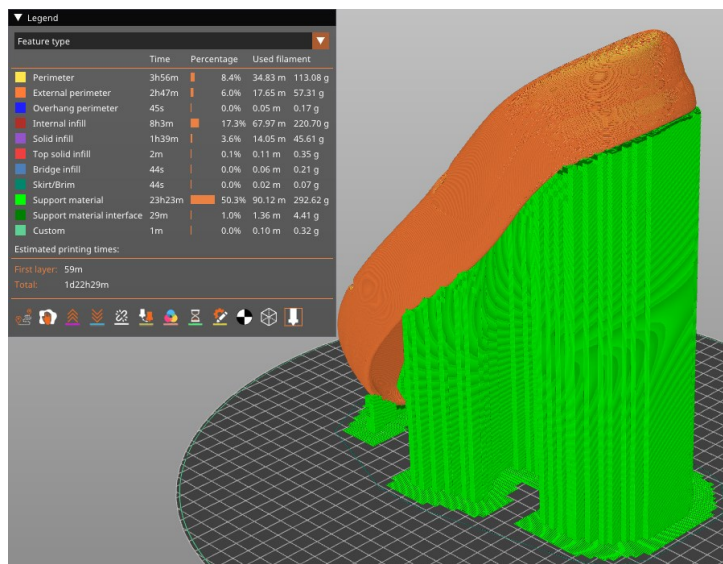
Podle této přidané skupiny polygonů byl vytvarován přibližný tvar v oblasti paty. Detailní dekorační prvky byly vytvořeny modelovacími štětci, maskováním a funkcí Inflate. Při modelování byla se spolupracujícím studentem dohodnuta menší změna v designu. Pro vytvoření dezénu byla v programu Gimp vytvořena maska, a ta následně přenesena na model. Pomocí funkce Inflate a Morph byl pak vytvořen požadovaný dezén ve 3D. Design dezénu byl upraven tak, aby jeho šířka byla alespoň 6 mm, kvůli tomu, aby se v něm nedržely drobné kamínky. Druhá podešev do páru byla vytvořena zrcadlením.



Obrázek 50: Hotový 3D model podešve

5.2.3 Tisk podešve

Pro tisk podešve se nejvíce hodila fotopolymerizační tiskárna, aby nebyly viditelné jednotlivé vrstvy, byla však vytisknuta na Delta FDM tiskárně, protože ta jediná byla dostupná. Model byl vložen do programu PrusaSlicer, kde byl diagonálně nakloněn, a podpěry tisku byly ručně upraveny tak, aby jich byl co nejmenší možný počet. A aby se tiskly stabilně, tak úzké podpěry byly buďto odstraněny, nebo spojeny s ostatními. Dále bylo místo, kde se tisková hlava zvyšuje v ose Z (tzv. Z-seam) bylo nastaveno, aby bylo na vnitřní straně podešve. Výplň byla zvolena Gyroid s 17 % výplně a stěny s tloušťkou 1,2 mm.



Obrázek 51: Model nachystaný na tisk v programu PrusaSlicer.

Pro tisk pravé podešve byl použit filament PETG a pro levou PLA+, různé materiály byly použity jenom kvůli jejich momentální dostupnosti. Tisk jedné podešve trval přibližně 2 dny. Po vytišení byly od podešví oddělené podpěry a chyby ve výtisku vyplněné lepidlem a zbroušeny.



Obrázek 52: Vytisknuté podešve.

5.3 Výroba silikonové formy

Silikonová forma byla vyrobena slepením vodotěsné nádrže, ve kterém byl odlit 3D výtisk podešve.

5.3.1 Vybrané silikonové směsi a separačního prostředku

Pro tvorbu silikonové formy byly otestovány 3 druhy odlévací silikonů. Jako nejefektivnější se osvědčil GMS A30 – Dawex Chemical, pro výrobu formy však byly použity všechny uvedené silikony, aby došlo k jejich využití.

GMS A30 – Dawex Chemical

Průsvitný dvousložkový, velmi dobře tekutý adiční silikon s výbornou kopírovací schopností. [40]

Tabulka 6 Vlastnosti GMS A30 – Dawex Chemical [40]

Cena za 1 kg	657 Kč
Zpracovatelnost	30-40 minut (200 g, 23 °C)
Vytvrzení	3-5 hodin při 23 °C nebo 20–30 minut při 60 °C
Tvrdost	30 ± 2 Shore A
Protažení do přeržení	350 %



Obrázek 53: GMS A30 od firmy Dawex Chemical [40]

GMS A20 – Dawex Chemical

Průsvitný dvousložkový, nízkoviskózní adiční silikon. [41]

Tabulka 7 Vlastnosti GMS A20 – Dawex Chemical [41]

Cena za 1 kg	657 Kč
Zpracovatelnost	30-40 minut (200 g, 23 °C)
Vytvrzení	3-5 hodin při 23 °C nebo 20–30 minut při 60 °C
Tvrdost	20 ± 2 Shore A
Protažení do přeržení	500 %



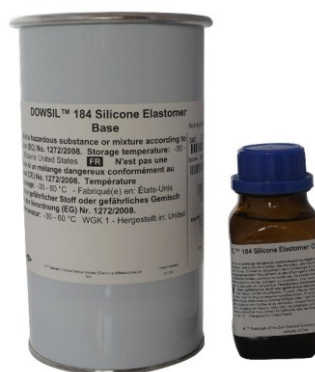
Obrázek 54: GMS A20 od firmy Dawex Chemical [41]

SYLGARD 184 - DOW

Průhledný dvousložkový silikon na bázi Polydimethylsiloxanu.[42]

Tabulka 8 Vlastnosti SYLGARD 184 – DOW [42]

Cena za 1 kg	6 000 Kč
Zpracovatelnost	30-40 minut (200 g, 23 °C)
Vytvrzení	48 hodin při 25 °C nebo 35 minut při 100 °C
Tvrдость	43 Shore A



Obrázek 55: SYLGARD 184 od firmy DOW [42]

Parafinový Separátor 200 – Dawex Chemical

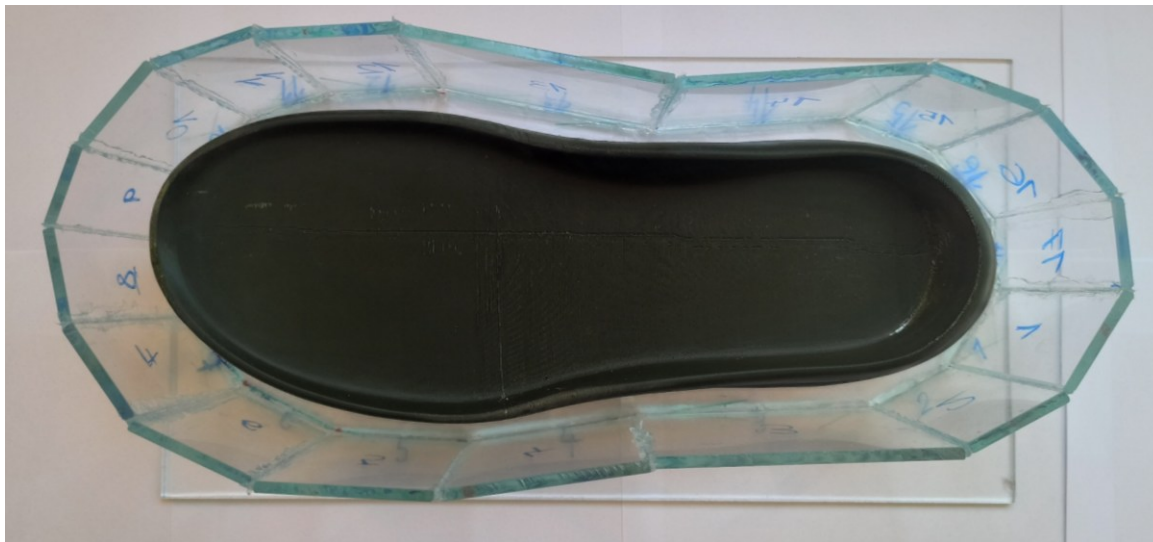
Separční přípravek pro spoje silikon – silikon, pryž. Cena za 200 ml je 338 Kč.[43]



Obrázek 56: Parafinový separátor od firmy Dawex Chemical [43]

5.4 Odlévání formy

Nádrže, ve kterých byly silikonové formy odlity, byly slepeny ze skla pomocí univerzálního silikonu a vytlačovací pistole na kartuše. Sklo bylo řezáno vytvořením rýhy řezákem na sklo s wolframovou čepelí a následným zlomením skla v místě rýhy a zabroušením ostrých hran diamantovým brouskem. Pro snadnější vyjmutí formy byla nádrž natřena parafrínovým separátorem Lukopen.



Obrázek 57: 3D tištěná podešev v nádrži pro odlévání silikonem

Odlévání probíhalo postupně po 200 ml dávkách, kvůli limitu maximální nosnosti váhy a pro lepší kontrolu nad procesem. Silikon byl důkladně zamíchán laboratorní míchačkou, předchozí pokusy ukázaly, že pouhé zamíchání rukou nestačí. Následně byl silikon vložen do vývěvy na 5 minut pro odstranění bublin. První dávka silikonu byla nechána zatuhnout do husté směsi a štětcem byla nanесena na spodní část podešve. Poté byla podešev vložena do nádrže a zalita zbytkem silikonu, dokud v něm podešev nebyla zcela ponořena. Na vytvoření jedné formy podešve bylo použito 2,5 kg silikonu. Po vyjmutí odlitku, kdy bylo potřeba nádrž zcela rozebrat, byla pomocí břitvy rozřezána na 2 poloviny. Aby řez byl v jedné rovině a stejné výšce, tak břitva do odlamovacího nože byla vlepena mezi plátky skla.



Obrázek 58: Břitva použitá pro rozpůlení silikonové formy



Obrázek 59: Silikonová forma

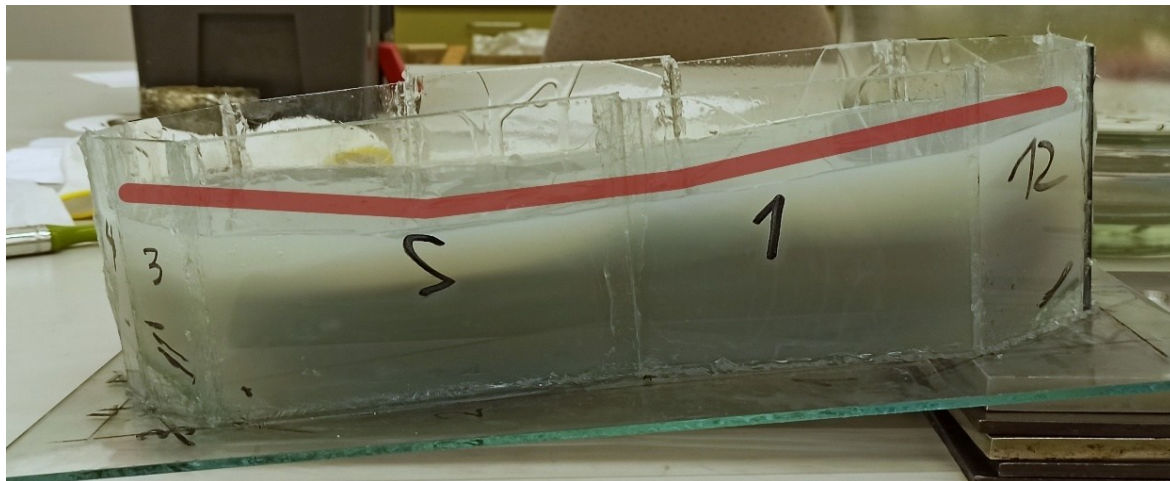
Bublíny ve formě byly dodatečně vyplněny pomocí injekční stříkačky a povrch znovu přetřen silikonem SYLGARD 184 - DOW. Zajímavé bylo, že aplikovaný silikon pro opravu formy tuhnul mnohem déle než se očekávalo, zbytkový silikon, který zbyl po zamíchání v kádince zatuhnul při 80 °C za 1 hodinu, kdežto na formě zatuhnul až po 48 hodinách při stejné teplotě.

Násleně byly pro jednotlivé poloviny slepeny nové menší nádrže, které sloužily k tomu, aby si forma tržela tvar a nezdeformovala se při odévání polyuretanem.



Obrázek 60: Nádrž pro zpevnění silikonové formy

V jednom případě byla podpurná nádrž vytvořená ze sádry, protože aby se ušetřilo silikonem, tak při výrobě silikonové formy byla nádrž s 3D výtiskem podešve nakloněna, což znamenalo její horní část nebyla rovná.



Obrázek 61: Nerovná horní část silikonové formy



Obrázek 62: Sádra pro zpevnění silikonové formy

6 ODLÉVÁNÍ PODEŠVE A JEJÍ HODNOCENÍ

Antistatická podešev byla vyrobena vlitím polyuretanové směsi s vodivým plnivem do silikonové formy.

6.1 Odlévání podešve

Při první pokusu pro odlití odešve z polyuretanu byl použit polyuretan GAFORM E70 o tuhosti Shore A 70 a s 6 hm% obsahu sazí Chezacarb AC80. Postupně byly po 200 ml dávkách byly odlity obě poloviny podešve, přičemž spodní část byla odlita s mezerou 2 mm odkraje. Po vytvrzení směsi byla spodní část formy dolita po okraj a horní část podešve přiložena pro pevné spojení obou částí. Ikdyž byly provedeny pokusy na menších tělesech, tak se ukázalo, že odhat požadované tuhosti materiálu nebyl přesný a výsledná podešev byla příliš tuhá. Při dalším pokusu byla stejnou směsí natřena přibližně 1,5 mm vrstva a zbytek formy byl dolit měkčím polyuretanem GAFOMR E45 s 1 hm% obsahem sazí Chezacarb AC80. Vnější vrstva tak sloužila pro zajištění vodivosti a pro zlepšení oděruvzdornosti. Pro zamaskování slepeného spoje byla podešev několikrát přetřena a zbroušena, dokud se nedosáhlo uspokojivého vzhledu. Kvůli nedostatku materiálů se do termínu odevzdání diplomové práce podařilo takto vyrobit pouze jednu podešev, druhá podešev do páru proto byla vyrobena z PUR 400 s 1 % výplní, ta již neměla antistatické vlastnosti a sloužila pouze pro ukázkou.



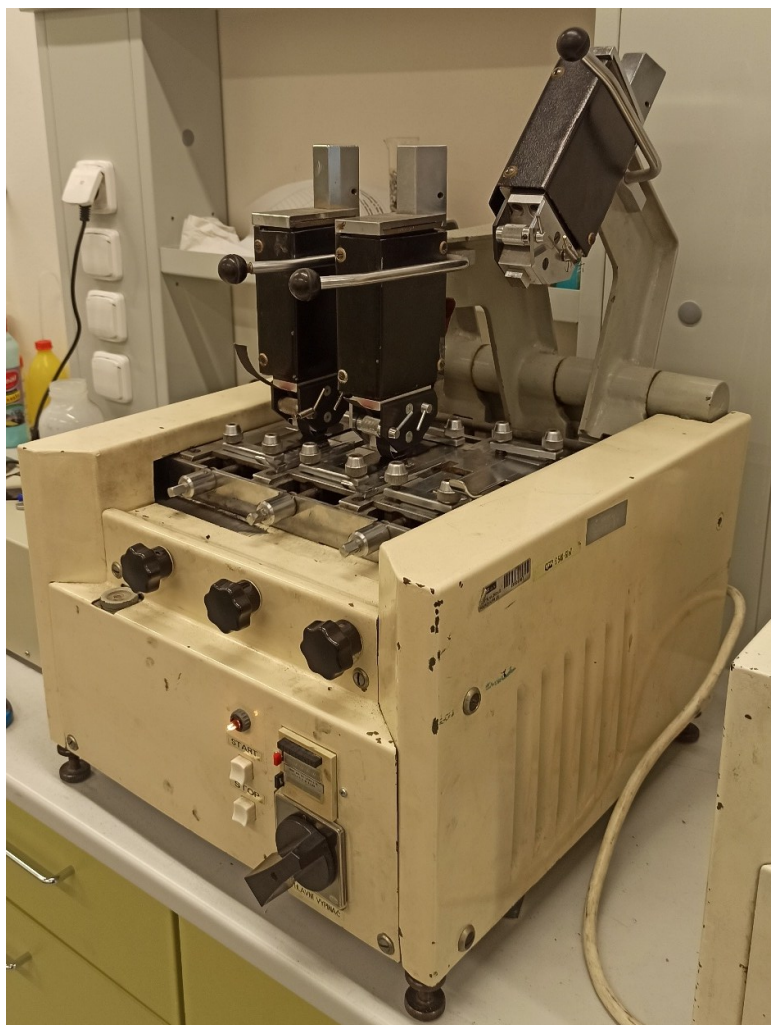
Obrázek 63: Odlité podešve

6.2 Testování vlastností podešve

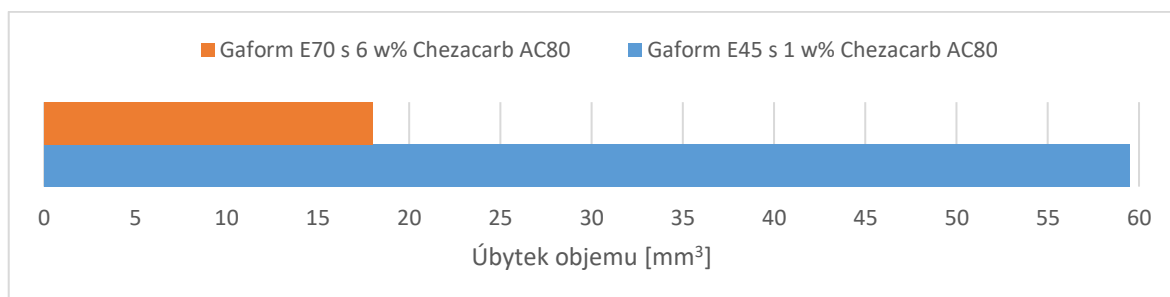
Bylo provedeno testování vodivých a mechanických vlastností podešve, zahrnující zkoušky odolnosti proti otěru a oděru, tahové zkoušky, měření elektrického odporu a přiložení podešve ke svršku.

6.2.1 Odolnost pryže proti otěru

Ze směsí polyuretanů, ze kterých byla podešev vyrobena byly měřeny vzorky podle normy ČSN 64 7031. Měření proběhlo na 3 vzorcích z každé směsi v délce 2000. Přídavné závaží mělo hmotnost 0,5 kg a zrnitost brusného papíru byla P120. Průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Grafu 3. Směs GAFORM E45 s 1 hm% Chezacarb AC80 ztratila 3,3x více objemu než GAFORM E70 s 6 hm% Chezacarb AC80. Celkový úbytek objemu byl u GAFORM E70 s 6 hm% Chezacarb AC8 117 mm² a u GAFORM E45 s 1 hm% Chezacarb AC80 358 mm². [44]



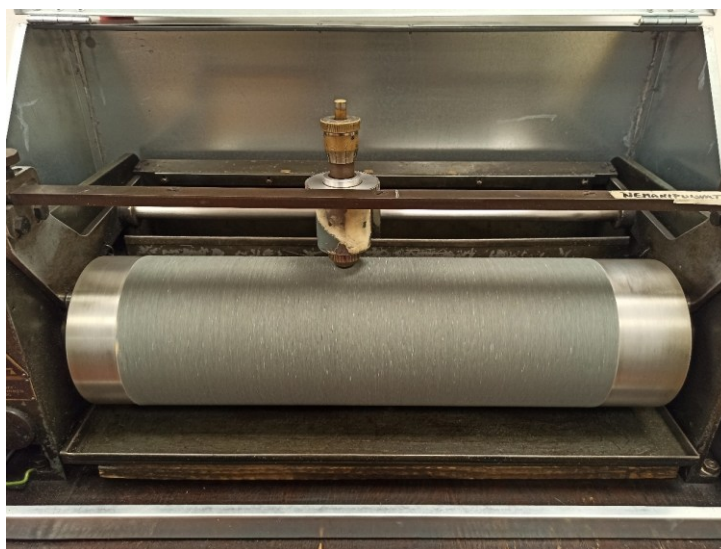
Obrázek 64: Testování vzorků proti otěru



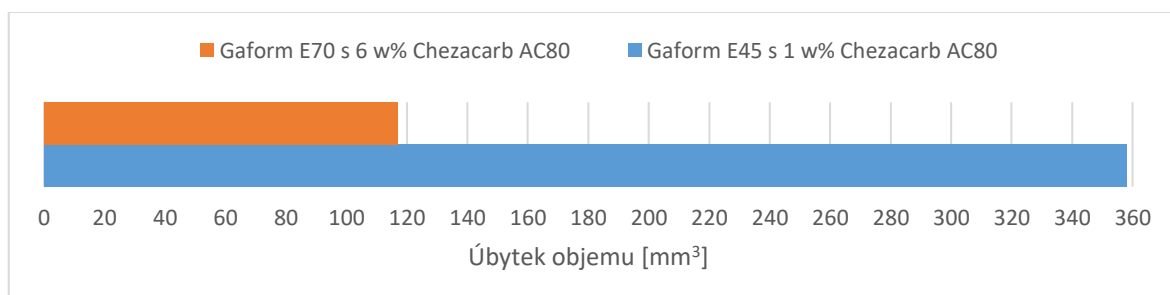
Graf 3: Úbytek objemu polyuretanů testu odolnosti proti otěru

6.2.2 Odolnost pryže proti oděru

Ze stejných směsí polyuretanů byly měřeny vzorky podle normy ČSN 62 1466, byl měřen jeden vzorek z každé směsi. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v grafu 4. Směs GAFORM E45 s 1 hm% Chezacarb AC80 ztratila 3,17x více objemu než Gaform E70 s 6 hm% Chezacarb AC80. Celkový úbytek objemu byl u GAFORM E70 s 6 hm% Chezacarb AC8 117 mm² a u GAFORM E45 s 1 hm% Chezacarb AC80 358 mm². [45]

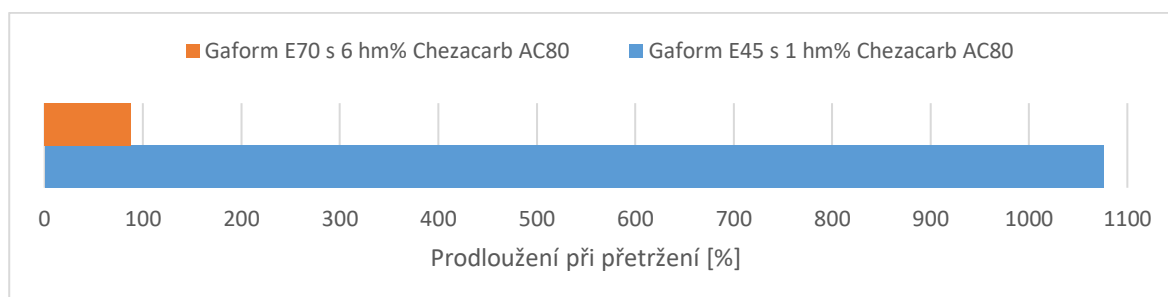


Obrázek 65: Testování vzorků proti oděru

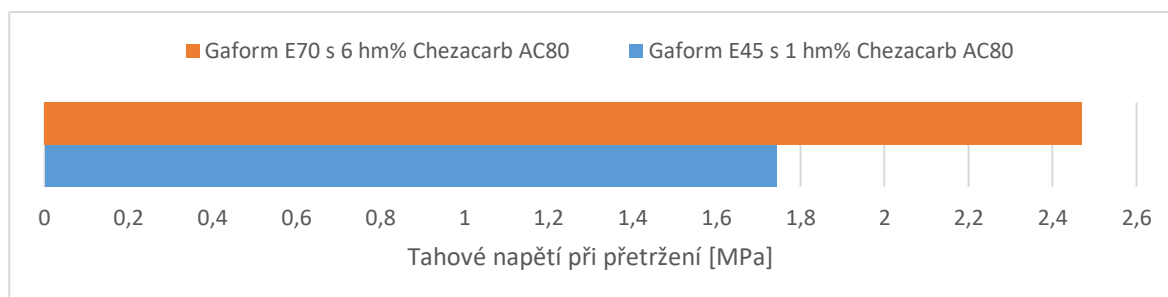
Graf 4: Úbytek objemu testu odolnosti proti oděru [mm²]

6.2.3 Tahová zkouška

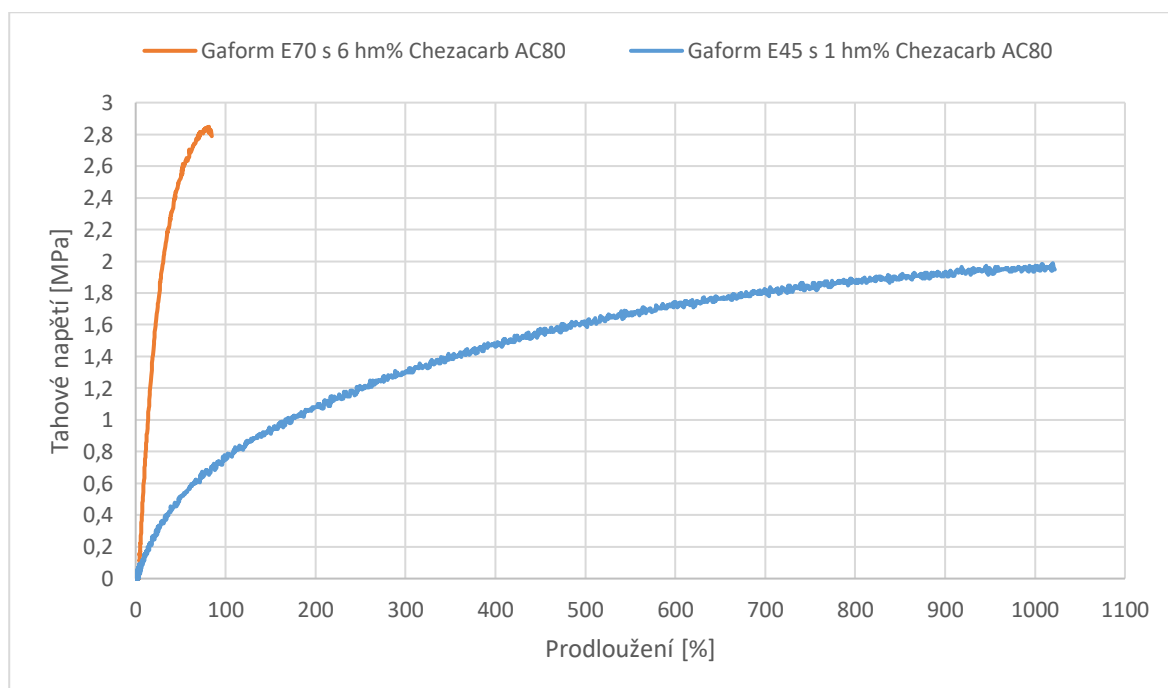
Podle normy ČSN EN 12803 byla Tahové napětí a délkové prodloužení při přetržení. Vzorky byly tlusté $1,25 \pm 0,2$ mm a rychlost tahu 200 mm/min. Byly testovány 4 vzorky z každé směsi. Průměrné hodnoty jsou uvedeny v Grafu 5 a 6, v Grafu 7 je uvedeny příklady tahových křivek. [46]



Graf 5: Průměrné hodnoty prodloužení při přetržení testovaných směsí [%]

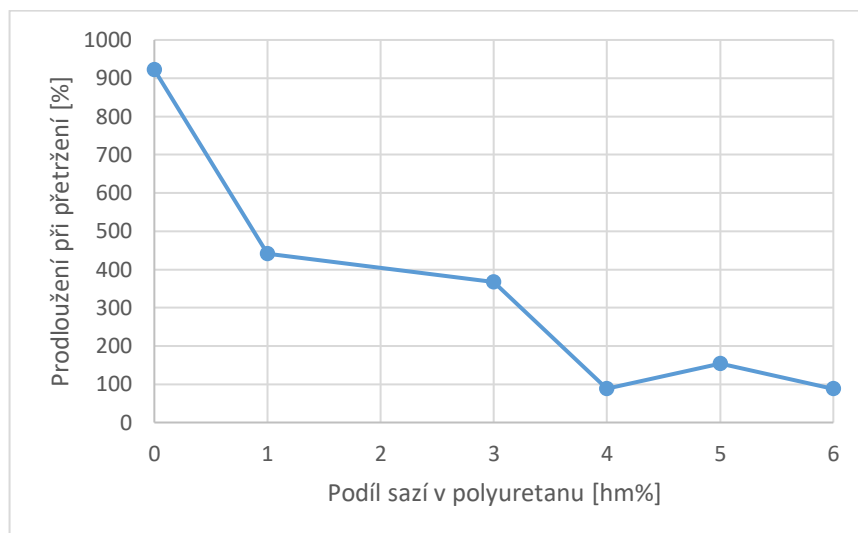


Graf 6: Průměrné hodnoty velikosti tahového napětí při přetržení [MPa]

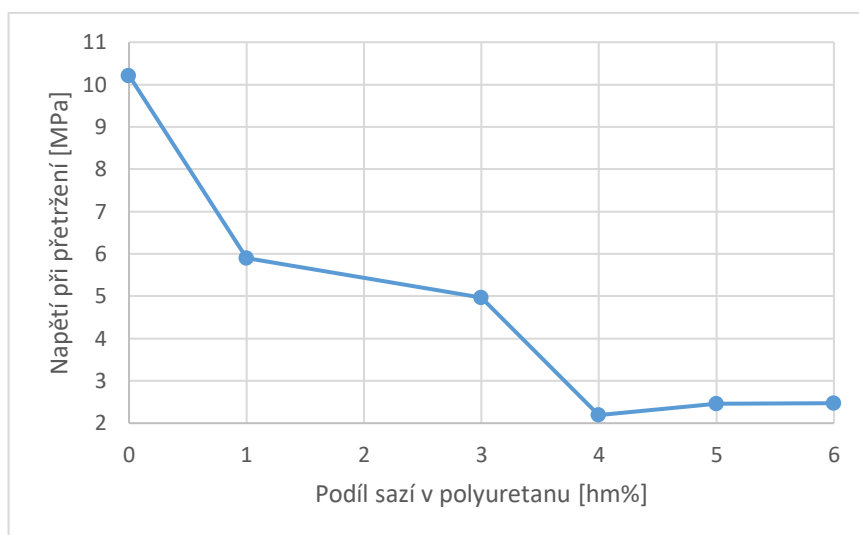


Graf 7: Typické průběhy tahové zkoušky

Pro studování vlivu množství plniva na mechanické vlastnosti byly namíchány směsi polyuretanu GAFORM E70 s 0, 1, 3, 4, 5 a 6 hm% sazí Chezacarb AC80. Průměrné hodnoty jsou uvedeny v Grafu 8 a 9, na těchto grafech lze vidět, že napětí a prodloužení při přetržení s rostoucím podílem sazí klesá.



Graf 8: Závislost prodloužení při přetržení [%] na podílu sazí polyuretanu [hm%]



Graf 9: Závislost napětí při přetržení [MPa] na podílu sazí polyuretanu [hm%]

6.3 Celkový odpor podešve

Odpor podešve měřený mezi vnější a spodní částí podešve byl změřen na 3 místech v suchém prostředí elektrodou s o ploše $31,67 \text{ cm}^2$ a zatížením 2,27 kg. Průměrná hodnota odporu byla 381,5 k Ω a podařilo se tak dosáhnout cíleného odporu antistatické podešve v rozmezí 0,1–10 M Ω . Objemová rezistivita podešve byla 78,5 k $\Omega \cdot \text{cm}$ a plošná 188 k Ω , místo měření bylo zvoleno v patě, protože se jedná o nejrovnější část.



Obrázek 66: Měření průchozí (vlevo) a plošné (vpravo) rezistence podešve

6.4 Kompletace podešve se svrškem

Hotová podešev byla ke svršku pouze přiložena, pokud by byla přilepena v lise, tak by ke svršku více přiléhala. Vzhled odlévané podešve by se dal vylepšit donalejším vyhlazením vstvého vzhledu 3D výtisku před vytvářením silikonové formy, došlo by tak k zachování více detailů a zefektivnění výroby odlité podešve, kterou bylo obtížné brousit. Dalším zlepšením vzhledu by se dosáhlo zvýrazněním dekoračních prvků 3D, aby při zbrušování podešve došlo k jejich lepšímu zachování. Svršek obuvi je funkční a velmi vzhledově povedený a design celé obuvi se podařilo úspěšně realizovat do fyzické podoby.



Obrázek 67: Antistatická podešev (vlevo) přiložená ke svršku boty a ukazková podešev bez antistatických vlastností (vpravo)

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zpracovat rešerši na téma antistatické obuvi a využití 3D tisku pro výrobu odlévacích a jiných forem, navrhnout a vytisknout model podešve použitelný pro výrobu formy, připravit z dostupných směsí a antistatických plniv vzorky, změřit jejich elektrické a mechanické vlastnosti, vyrobit z vybraných směsí podešev a výsledky vyhodnotit. Na základě normy ČSN EN ISO 20345 byl stanovený cíl odporu podešve v rozmezí 0,1–10 M Ω . Jako nejvhodnější vyhodnocena směs GAFORM E70 s 6 hm.% sazí Chezacarb AC80 pro stěny podešve a GAFORM E45 s 1 hm.% sazí Chezacarb AC80 pro vnitřní materiál podešve. Naměřený odpor hotové podešve dosáhl 381,5 k Ω a tak se podařilo dosáhnout stanoveného cíle. Technologický postup zahrnoval přípravu obuvnického kopyta podle 3D skenu, návrh a tisk modelu podešve, výrobu silikonové formy a finální odlévání směsi. Výsledky zkoušek potvrzují, že zvolená kombinace materiálů i použité výrobní metody umožňují výrobu antistatických prvků s požadovanou funkcí a dobrou opakovatelností. Prostor ke zlepšení zůstává zejména v přesnosti povrchu tištěných forem a kvalitě detailů výsledné podešve, což lze ovlivnit úpravou parametrů tisku nebo postprocesingem. Další směr by měl zahrnovat ověření dlouhodobé vodivosti při reálném zatížení, testování většího vzorku směsí v kombinaci s různými typy plniv a případně vývoj plně funkční obuvi s antistatickými vlastnostmi ve všech vrstvách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN ISO 20345. *Osobní ochranné prostředky – Bezpečnostní obuv*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [2] SAVARINO, Paolo; COLOMBO, Matteo; MAURI, Enrico; PIOVANI, Riccardo; BIGONI, Davide. *Design of a customized sole for diabetic foot through 3D printing. Additive Manufacturing*, 2020, roč. 35, článek 101237. ISSN 2214-8604. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101237.
- [3] The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Resistance*. Online. *Encyclopædia Britannica*. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/resistance-electronics>. [cit. 2025-03-04].
- [4] ČSN EN 62631-3-1. *Izolační materiály – Elektrické izolační vlastnosti – Stanovení elektrického odporu a rezistivity – Část 3-1: Povrchový odpor*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [5] ČSN EN 62631-3-2. *Izolační materiály – Elektrické izolační vlastnosti – Stanovení elektrického odporu a rezistivity – Část 3-2: Měrná rezistivita*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [6] LEE, Heon-Gyeong; KIM, Jin-Gyu. *Volume and surface resistivity measurement of insulating materials using guard-ring terminal electrodes*. Online. *Energies*. 2020, 13(11), článek 2811. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en13112811. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2811>. [cit. 2025-05-08].
- [7] MUTISO, R.M.; WINEY, K.I. 7.17 – *Electrical Conductivity of Polymer Nanocomposites*. Online. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Elsevier, 2012, s. 327–344. ISBN 9780080878621. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00196-5>. [cit. 2025-05-03].
- [8] WANG, Guotong; WANG, Chengyuan; ZHANG, Faling; YU, Xiaozhu. *Electrical percolation of nanoparticle-polymer composites*. Online. *Computational Materials Science*. 2018, 150, s. 102-106. ISSN 0927-0256. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.03.051>. [cit. 2025-05-03].
- [9] BIAN, Yuhan; SHI, Haozhou; YUAN, Qunchen; ZHU, Yuxuan; LIN, Zhengzi; ZHUANG, Liujing; HAN, Xun; WANG, Ping; CHEN, Mengxiao; WANG, Xiandi. *Patterning Techniques Based on Metallized Electrospun Nanofibers for Advanced*

Stretchable Electronics. Online. *Advanced Science*. 2024/04/30, 11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/advs.202309735>. [cit. 2025-05-03].

[10] KLARAK, Jaromir; KURIC, Ivan; Zajačko, Ivan; Bulej, Vladimír; Tlach, Vladimír; Józwik, Jerzy. *Analysis of Laser Sensors and Camera Vision in the Shoe Position Inspection System*. Online. *Sensors*. 2021, 21, 7531. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s21227531>. [cit. 2025-05-03].

[11] GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Online. 2nd ed. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2113-3. [cit. 2025-05-03].

[12] POU, Juan; RIVEIRO, Antonio; DAVIM, J. Paulo (eds.). *Additive Manufacturing*. Online. 1st ed. May 21, 2021. Imprint: Elsevier. English. Paperback ISBN: 9780128184110; eBook ISBN: 9780128184127. Dostupné z: <https://vufind.katalog.k.utb.cz/Record/104848> [cit. 2025-05-03].

[13] FORMLABS. *FDM vs SLA vs SLS: How to Choose the Right 3D Printing Technology*. Online. *Formlabs*. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>. [cit. 2025-05-03].

[14] PRUSA3D. *Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi*. Online. *Prusa Knowledge Base*. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi_112464. [cit. 2025-05-03].

[15] BCN3D. *The most popular 3D printing materials in FDM and their properties*. Online. *BCN3D*, Feb 8, 2022. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/the-most-popular-3d-printing-materials-in-fdm-and-their-properties/>. [cit. 2025-05-03].

[16] MANUFACTURING GUIDE. *Fused Deposition Modeling, FDM*. Online. *Manufacturing Guide*. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/sv/fused-deposition-modeling-fdm>. [cit. 2025-05-03].

[17] O'CONNELL, Jackson. *The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More*. Online. *All3DP*. Jul 8, 2023. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scarab-belt-corexy-polar/>. [cit. 2025-05-03].

[18] CARTESIAN COORDINATE SYSTEM. Wikipedia [online]. [cit. 2025-05-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cartesian_coordinate_system

- [19] SIMPLE ENGLISH WIKIPEDIA. *Polar coordinate system*. Online. Simple English Wikipedia, the free encyclopedia. Dostupné z: https://simple.wikipedia.org/wiki/Polar_coordinate_system. [cit. 2025-05-03].
- [20] TEACHING TECH. *CoreXY explained: Comparison + strengths & weaknesses* [video]. 8. 11. 2019. Online. YouTube. Dostupné z: https://youtu.be/_ramiM3KHYE. [cit. 2025-05-03].
- [21] ANG, Gedeon. *Bed Slinger (3D Printing): What Is It Exactly?* Online. All3DP, Nov 4, 2023. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/bed-slinger-3d-printing-simply-explained/>. [cit. 2025-05-03].
- [22] Teaching Tech. (2019, November 8). *CoreXY explained: Comparison + strengths & weaknesses* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=_ramiM3KHYE
- [23] ANG, Gedeon. *Bed Slinger (3D Printing): What Is It Exactly?* Online. All3DP, Nov 4, 2023. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/bed-slinger-3d-printing-simply-explained/>. [cit. 2025-05-03].
- [24] TRADING3D. *Anycubic Metal Predator 3D Printer Hotend – Large Build Volume 370-455mm, Muti-functional 3D Delta Printer*. Online. Trading3D. Dostupné z: <https://www.trading3d.com/product/anycubic-metal-predator-3d-printer-hotend-large-build-volume-370-455mm-muti-functional-3d-delta-printer/>. [cit. 2025-05-03].
- [25] INDIAMART. *Hbot 3D Printer at ₹60000/piece | 3D Color Printing Machine in Jalandhar*. Online. IndiaMART. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/hbot-3d-printer-21012666833.html>. [cit. 2025-05-03].
- [26] FABERANT 3D. *CoreXY proti H-Bot: Srovnání kinematiky ve fyzikální simulaci*. Online. 3DToday, 4. 9. 2019. Dostupné z: <https://3dtoday.ru/blogs/faberant-3d/corexy-protiv-h-bot-sravnenie-kinematiki-v-fizicheskoy-simulyatsii>. [cit. 2025-05-03].
- [27] ENGLISH WIKIPEDIA. *SCARA*. Online. Wikipedia, the free encyclopedia. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/SCARA>. [cit. 2025-05-03].
- [28] 3D POTTER TECH SUPPORT. *Scara Operation: 3D Potter Scara and Scara Mini* [video]. 29. 7. 2019. Online. YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=C9t-qfygyX4>. [cit. 2025-05-03].
- [29] MOHANYA, Shubham; ., Krishnanand; NAYAK, Ankit; TAUFIK, Mohammad. *Estimation of surface roughness for digital light processing based additively manufactured*

parts. Online. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024/11/01, 1–20. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00827-2>. [cit. 2025-05-03].

[30] EVERBEAM. *Best UV Light for Resin: A Comprehensive Guide*. Online. Everbeam, May 20, 2022. Dostupné z: <https://shopeverbeam.com/blogs/news/best-uv-light-for-resin-a-comprehensive-guide>. . [cit. 2025-05-03].

[31] ANYCUBIC. *How Long to Cure Resin Prints*. Online. Anycubic, Mar 13, 2023. Dostupné z: <https://store.anycubic.com/blogs/3d-printing-guides/how-long-to-cure-resin-prints>. [cit. 2025-05-03].

[32] TUCHIN, Valery. *Tissue Optics and Photonics: Biological Tissue Structures*. Online. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, vol. 1, 2015/03/28, 3–21. Dostupné z: <https://doi.org/10.18287/JBPE-2015-1-1-3>. . [cit. 2025-05-03].

[33] ANIWAA. *List of 3D printing technologies – guide on all 3D printing technologies*. Online. Aniwaa, Nov 24, 2023. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/guide/3d-printers/3d-printing-technologies/>. [cit. 2025-05-03].

[34] FORMLABS. *SLA vs. DLP vs. MSLA vs. LCD: Guide to Resin 3D Printers*. Online. Formlabs. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>. [cit. 2025-05-03].

[35] MADE WITH LAYERS. *The Prusa SLIS redefines SPEED!* [video]. 22. 10. 2021. Online. YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=mtojERR91Rw>. [cit. 2025-05-03].

[36] LEVNETMELY. *PUR 400, 1 kg, Pružný UV stabilní transparentní polyuretan*. Online. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/pur-400--1-kg--pruzny-uv-stabilni-transparentni-polyuretan/>. [cit. 2025-05-03].

[37] LEVNETMELY. *GAFORM E70, bal. 1 kg (0,6 kg složky A + 0,4 kg složky B)*. Online. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/gaform-e70--bal--1-kg--0-6-kg-slozky-a-0-4-kg-slozky-b/>. [cit. 2025-05-03].

[38] LEVNETMELY. *GAFORM E45, bal. 1 kg (0,5 kg složky A + 0,5 kg složky B)*. Online. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/gaform-e45--bal--1-kg--0-5-kg-slozky-a-0-5-kg-slozky-b/>. [cit. 2025-05-03].

[39] MATERIALISE. *Footscan Pressure Plate and 3D Scanners*. Online. Materialise. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/healthcare/phits-suite/pressure-plates-3d-scanners>. [cit. 2025-05-03].

[40] LEVNETMELY. *GMS A30, adiční silikon, 1 kg (0,5 kg A + 0,5 kg B)*. Online. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/gms-a30--adicni-silikon--1-kg--0-5-kg-a-0-5-kg-b/>. [cit. 2025-05-03].

[41] LEVNETMELY. *GMS A20, adiční silikon, 1 kg (0,5 kg A + 0,5 kg B)*. Online. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/gms-a20--adicni-silikon--1-kg--0-5-kg-a-0-5-kg-b/>. [cit. 2025-05-03].

[42] FARNELL. *SYLGARD 184, 1.1KG DOW, Silikonový Elastomer, Flowable, Sylgard® 184, RT Tvrzení, Transparentní, Kontejner, 1,1kg*. Online. Farnell. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/dowsil-formerly-dow-corning/sylgard-184-1-1kg/elastomer-clear-184-1-1kg/dp/101697>. [cit. 2025-05-03].

[43] LEVNETMELY. *Lukopren Parafinový Separátor 200 ml*. Online. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/lukopren-parafinovy-separator-200-ml/>. [cit. 2025-05-03].

[44] ČSN 64 7031. *Zkoušení syntetických usní. Stálost úpravy při otřebu a odřebu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.

[45] ČSN 62 1466. *Pryž. Stanovení odolnosti proti odírání na přístroji s otáčivým bubnem*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 1993.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Sonda s kruhovými elektrodami [6]	14
Obrázek 2: Typická perkolační křivka v grafu závislosti konduktivity na objemovém podílu plniva [9]	15
Obrázek 3: Diagram základních částí obuvi [10]	16
Obrázek 4: Základní postup aditivní výroby [12]	18
Obrázek 5: Schéma FDM/FFF tiskárny: pohyblivá platforma (1), plastový filament (2) je veden válečky (3) do tavicí trysky (4), která nanáší materiál a vytváří objekt (5) [16]	19
Obrázek 6: Příklad dělení FDM/FFF 3D tiskáren [17]	19
Obrázek 7: Body v polárním souřadnicovém systému, počátek je značen číslem 0 a zvolená osa ležící v rovině je značena písmenem L, dále bod se souřadnicemi $[r = 3; \varphi = 60^\circ]$ a $[r = 4; \varphi = 210^\circ]$ [19]	20
Obrázek 8: Válcový souřadnicový systém, každý bod je určen vzdáleností od počátku (r), úhlem φ a výškou nad rovinou souřadnicového systému (Z) [19]	20
Obrázek 9: FDM tiskárna XZ-Head (Bed Slinger) [14]	21
Obrázek 10: Artefakty na testovacím tisku na ose Y tzv. „ghosting“, opakující se obrysy písmena Y způsobené rezonancí, kvůli vyšší hmotnosti pohybujících se částí [20]	22
Obrázek 11: Motory os XY-Head 3D tiskárny Ender 5 [22]	23
Obrázek 12: Pohyb osy Z XY-Head 3D tiskárny Ender 5 [22]	23
Obrázek 13: Ukázka neefektivity využití vertikálního prostoru a schéma pohybu 3D delta 3D tiskárny [14, 23]	24
Obrázek 14: Schématické rozložení XY os H-bot 3D tiskárny [24]	25
Obrázek 15: H-bot 3D tiskárna [25]	25
Obrázek 16: Schématické zobrazení působení sil H-Bot 3D tiskárny v osách X a Y [24] ..	26
Obrázek 17: Schématické zobrazení působení sil H-Bot 3D tiskárny v osách X a Y [24] ..	27
Obrázek 18: Rotace systému způsobená působícími silami rozložení CoreXY a H-Bot [26]	27
Obrázek 19: 3D tisk za pomoci robotické ruky SCARA [28]	28
Obrázek 20: 3D tiskárna typu Polar [14]	29
Obrázek 21: Schéma typické fotopolymerizační tiskárny [29]	30
Obrázek 22: Spektrum elektromagnetického záření (světla) [32]	31
Obrázek 23: SLA, DLP a LCD fotopolymerizační 3D tiskárny [33]	31
Obrázek 24: SLA 3D tiskárna [14]	32
Obrázek 25: DLP 3D tiskárna [14]	32
Obrázek 26: MSLA 3D tiskárna [34]	33
Obrázek 27: Zdroj UV světla a LCD displej u MSLA 3D tiskárny [34]	33
Obrázek 28: SLS 3D tiskárna [14]	34

Obrázek 29: PUR 400 od firmy Dawex Chemical [36]	37
Obrázek 30: GAFORM E70 od firmy Dawex Chemical [37]	37
Obrázek 31: GAFORM E45 od firmy Dawex Chemical [38]	38
Obrázek 32: Ukázka části odlitých vzorků pro test rezistivity	39
Obrázek 33: TeraOhmmetr Warmbier Metriso 3000 zapojený pro měření objemové rezistivity.....	40
Obrázek 34: 3D skener Tiger od firmy Materialise NV [39].....	42
Obrázek 35: Vyhlazený sken chodila.....	43
Obrázek 36: Upravené obuvnické kopyto.....	43
Obrázek 37: Cívka filamentu CPE HG100	44
Obrázek 38: Nepovedené výtisky	44
Obrázek 39: Dokončené obuvnické kopyto	44
Obrázek 40: Boční 2D design obuvi	45
Obrázek 41: Design dezénu podešve	45
Obrázek 42: Zjednodušení geometrie kopyta	46
Obrázek 43: Vysunutí obrysu kopyta jako nové těleso.....	46
Obrázek 44: Odečení vysunutého obrysu z horizontální pracovní plochy	47
Obrázek 45: Dodatečné tvarování podešve v program Inventor.....	47
Obrázek 46: Optimalizace sítě	48
Obrázek 47: Hrubý tvar podešve	48
Obrázek 48: Vyhlazení hranice mezi skupinami polygonů	49
Obrázek 49: Polygony rovnoběžné s hranou mezi skupinami polygonů.....	49
Obrázek 50: Hotový 3D model podešve	50
Obrázek 51: Model nachystaný na tisk v programu PrusaSlicer.	51
Obrázek 52: Vytisknuté podešve.	51
Obrázek 53: GMS A30 od firmy Dawex Chemical [40]	52
Obrázek 54: GMS A20 od firmy Dawex Chemical [41]	53
Obrázek 55: SYLGARD 184 od firmy DOW [42]	53
Obrázek 56: Parařinový separátor od firmy Dawex Chemical [43].....	53
Obrázek 57: 3D tiřřená podeřev v nádrži pro odlévání silikonem.....	54
Obrázek 58: Břitva použitá pro rozpůlení silikonové formy	54
Obrázek 59: Silikonová forma	55
Obrázek 60: Nádrž pro zpevnění silikonové formy	55
Obrázek 61: Nerovná horní část silikonové formy	56
Obrázek 62: Sádra pro zpevnění silikonové formy.....	56

Obrázek 63: Odlité podešve.....	57
Obrázek 64: Testování vzorků proti otěru	58
Obrázek 65: Testování vzorků proti oděru	59
Obrázek 66: Měření průchozí (vlevo) a plošné (vpravo) rezistence podešve.....	62
Obrázek 67: Antistatická podešev (vlevo) přiložená ke svršku boty a ukazková podešev bez antistatických vlastností (vpravo)	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přibližná doba vyvozování výtisku v závislosti na použití zdroje UV záření [31]	30
Tabulka 2 Shrnutí 3D tiskových technologií [11, 14]	34
Tabulka 3 Vlastnosti PUR 400 – Dawex Chemical [36]	36
Tabulka 4 Vlastnosti GAFORM E70 – Dawex Chemical [37]	37
Tabulka 5 Vlastnosti GAFORM E45 – Dawex Chemical [38]	38
Tabulka 6 Vlastnosti GMS A30 – Dawex Chemical [40]	52
Tabulka 7 Vlastnosti GMS A20 – Dawex Chemical [41]	52
Tabulka 8 Vlastnosti SYLGARD 184 – DOW [42]	53

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CAD	Computer-Aided Design
ESD	Electrostatic Discharge
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
PUR	Polyurethane
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
LCD	Liquid Crystal Display
SLS	Selective Laser Sintering
UV	Ultraviolet
AMF	Additive Manufacturing File
PLA	Polylactic Acid
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate
TPE	Thermoplastic Elastomer
HIPS	High Impact Polystyrene
PC	Polycarbonate
TPU	Thermoplastic Polyurethane

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technické listy polyuretanů – PUR 400, GAFORM 45, GAFORM E70

Příloha P II: Technické listy silikonů – GMS A30, GMS A20, SYLGAD 184