



## **Bakalářská práce**

# **Konstrukce třetí osy pro 3D tisk skla technologií SLM**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Ladislav Horálek**

*Vedoucí práce:*

Ing. Marie Stará, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

*Konzultant práce:*

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Konstrukce třetí osy pro 3D tisk skla technologií SLM

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Ladislav Horálek</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S19000037
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra sklářských strojů a robotiky
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

### Zásady pro vypracování:

3D tisk je v současné době předmětem intenzivního vývoje nových aplikací a nových materiálů pro tuto aditivní technologii. Jedním ze zkoumaných materiálů je sklo, ale výzkum zatím nepřináší univerzální a průmyslově použitelné řešení. V rámci základního výzkumu na katedře je zkoumána technologie 3D tisku skla založená na principu fúze z práškového lože, přesněji selektivního tavení pomocí laseru (Selective Laser Melting, SLM), kdy jsou na pracovní plochu postupně nanášeny tenké vrstvy práškového materiálu, které se paprskem laseru taví. Hotová vrstva je pokryta další vrstvou prášku a proces se opakuje.

Cílem práce je rozšířit dříve pořízený rovinný laserový plotr třetí osou a zajistit tak základní princip 3D tisku.

*Úkolem Vaší BP bude:*

1. Provést rešerši možností provedení třetí osy 3D tiskárny a na základě analýzy dosavadních výstupů vybrat vhodný princip.
2. Alternativní studie třetí osy plotru včetně základny s výběrem optimální varianty.
3. Zpracovat konstrukční řešení vybrané varianty formou 3D modelu a výkresové dokumentace.
4. Zhodnotit přínos předloženého řešení včetně doporučení pro vývoj dalších verzí 3D tiskárny.

*Rozsah grafických prací:* výkresová dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 30 – 40 stran textu  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] HEN Z., Z. LI, J. LI, Ch. LIU, Ch. LAO, Y. FU, Ch. LIU, Y. LI, P. WANG a Y. HE. 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*. 2019;39(4) : 661–687.
- [2] HOTAŘ V., M. STARÁ, V. MAKOVÁ. Present state of 3D printing from glass. Přípravovaný text rešerše 3D tisku ze skla k vydání.
- [3] BRUDER A., et al. Development of a 3D-Printer for HT-SLS of Fused Silica Powder , Joint Meeting of DGG, ČSS & SSS, Proceeding of 92nd Annual Meeting of the German Society of Glass Technology in [4] Conjunction with the Annual Meetings of the Czech Glass Society & the Slovak Glass Society, 28 – 30 May 2018, Bayreut. 2018; 110.
- [5] KHMYROV R. S., S.N. GRIGORIEV, A. A. OKUNKOVA, A. V. GUSAROV. On the possibility of selective laser melting of quartz glass. *Phys Procedia*. 2014;56:345–56.
- [6] FATERI M., A. GEBHARDT. Selective laser melting of soda-lime glass powder. *Int J Appl Ceram Technol*. 2015;12(1):53–61.
- [7] DATSIU K. C., E. SALEH, F. SPIRRETT, R. GOODRIDGE, I. ASHCROFT, D. EUSTICE. Additive manufacturing of glass with laser powder bed fusion. *J Am Ceram Soc*. 2019; 102: 4410– 4414.
- [8] LUO J., H. PAN, E. C. KINZEL. Additive Manufacturing of Glass, *JF Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014; 36(6).
- [9] LUO, J., GILBERT, L., QU, CH., LANDERS, R. G., BRISTOW, D. A., KINZEL, E. C. Additive Manufacturing of Fused Silica Glass Using Direct Laser Melting. AW3I.4. 2019; 10.1364/CLEO\_AT.2019.AW3I.4.

*Vedoucí práce:* Ing. Marie Stará, Ph.D.  
Katedra sklářských strojů a robotiky

*Konzultant práce:* doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.  
Katedra sklářských strojů a robotiky

*Datum zadání práce:* 22. listopadu 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:* 29. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním provedením třetí osy laserového plotru pro 3D tisk metodou SLM. Vhodný koncept pro svislý posuv stolků s práškovým materiálem byl zvolen na základě zkoumání dostupných řešení různých technologií 3D tisku na podobném principu. Na základě těchto poznatků a výsledků studie bylo zhotoveno konstrukční řešení formou 3D modelu a výrobní dokumentace. Toto zařízení bylo následně zhotoveno a je určeno k laboratornímu testování.

## Abstract

This bachelor thesis deals with the design of the third axis of a laser plotter for 3D printing by SLM method. A suitable concept for the vertical transportation of the powder tables was chosen by investigating the available solutions of different 3D printing technologies based on a similar principle. Based on these findings and the results of the study, a design solution in the form of a 3D model and manufacturing documentation was produced. This device was subsequently fabricated and is now used for laboratory tests.

## Poděkování

Nejprve chci poděkovat vedoucí mé práce, a to Ing. Marii Staré, Ph.D., za odborné rady nejen při konstrukčním návrhu, ale i při psaní této bakalářské práce. Za možnost konzultací během návrhu zařízení velice děkuji Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. a doc. Ing. Vlastimilu Hotařovi, Ph.D.

Za poskytnutí prostor a materiálů pro vypracování této práce děkuji celé Katedře sklářských strojů a robotiky.

Na závěr chci poděkovat celé mé rodině za veškerou podporu a také mé přítelkyni za všechny rady a podporu během studia a tvorby této práce.

# Obsah

Úvod .....	9
1. 3D tisk a jeho využití v současnosti .....	10
1. 1. Plast .....	10
1. 2. Kov .....	11
1. 3. Keramika .....	11
1. 4. Sklo a křemičité materiály .....	12
1. 4. 1. Tisk skla pomocí filamentu .....	12
1. 4. 2. Stereolitografie skla (SLA) .....	13
1. 4. 3. Extruzní tisk – G3DP (Glass 3D printing) .....	13
1. 5. Spékání laserovým paprskem (SLM) .....	14
1. 5. 1. Princip a proces tisku SLM .....	14
1. 5. 2. Procesní parametry tisku SLM .....	15
1. 5. 3. Chyby tisku SLM .....	16
2. Možnosti konstrukce svislého posuvu PBF tiskáren .....	17
2. 1. Uchycení pohonu .....	17
2. 1. 1. Motor uchycený k rámu tiskárny .....	17
2. 1. 2. Motor uchycený k tiskové ploše .....	18
2. 1. 3. Motor uchycený ze stran tiskového prostoru .....	19
2. 2. Dávkování sypkého materiálu .....	19
2. 2. 1. Druhým svislým posuvem .....	19
2. 2. 2. Násypkou Dávkování materiálu pomocí dvou zásobníků .....	20
2. 3. Pěchování práškového materiálu .....	21
2. 3. 1. Pěchování dávkovacím válečkem .....	21
2. 3. 2. Pěchování motorem tiskové plochy .....	22
2. 4. Těsnění tiskového prostoru .....	22

2. 5. Požadované vlastnosti navrhovaného zařízení .....	23
2. 5. 1. Laserové zařízení .....	23
2. 5. 2. Tiskový práškový materiál.....	23
2. 6. Volba vhodného provedení.....	24
3. Konstrukční řešení svislé osy 3D tiskárny .....	26
3. 1. Rám tiskového zařízení .....	27
3. 2. Komory s práškovým materiálem.....	28
3. 3. Pohon svislé osy .....	29
3. 3. 1. Krokové motory .....	29
3. 3. 2. Uchycení vodicích tyčí a matic.....	30
3. 3. 3. Doraz svislého posuvu .....	31
3. 4. Pěchování materiálu .....	32
3. 5. Těsnění tiskového prostoru.....	33
3. 6. Ovládání mechanismu .....	34
4. Technickoekonomické zhodnocení.....	36
4. 1. Technické zhodnocení .....	36
4. 2. Ekonomické zhodnocení.....	37
Závěr.....	38
Literatura .....	39
Seznam obrázků .....	41
Seznam výkresové dokumentace .....	43



# Úvod

Sklo je jeden z nejstarších lidmi zpracovávaných materiálů a již po několik tisíciletí nás fascinuje svou krásou, průhledností a univerzálností. Od prvních zmínek o skleněných výrobcích, okolo roku 3000 př. n. l., urazila technologie výroby skla dlouhou etapu vývoje a zdokonalování.

Tradiční techniky jako foukání skla a jeho ruční tvarování stále vyžadují velkou míru zručnosti a zkušeností sklářů. Novodobé průmyslové výrobní technologie, jako je např. výroba plochého skla plavením, lisování, úzkohrdlý lisofuk užitkového skla (ÚHLF), techniky foukání, tažení skla atd., nyní umožňují sériovou výrobu skla. Nicméně, v posledních letech se v oblasti zpracování skla čím dál více objevuje inovativní technologie, a tou je 3D tisk.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit konstrukci svislého posuvu zařízení pro tisk mikromletých křemičitých prášků a bílých sazí metodou SLM. Prvním krokem je rozbor současného stavu 3D tisku a rešerše možností provedení svislé osy 3D tiskáren. Na základě počátečních experimentů a volbě vhodného provedení byl vytvořen koncepční návrh, na který navazuje hlavní část této práce, a tou je samotné konstrukční provedení. Tato kapitola je rozdělena do jednotlivých hlavních částí konstrukce.

V závěru práce je popsán výsledný stav a přínos konstrukce a na základě dosavadních poznatků také návrhy pro budoucí úpravy a vývoj.

# 1. 3D tisk a jeho využití v současnosti

3D tisk, nebo také aditivní technologie, je způsob výroby prostorových dílů za pomoci přidávání materiálu. Jednotlivé technologie se liší tím, jaký materiál je používán a jakým způsobem se jednotlivé vrstvy na sebe nanášejí.

V současnosti je 3D tisk běžně používán v mnoha různých průmyslových oblastech. Kromě průmyslu také v medicíně, vzdělávání, designu a architektuře. Technologie 3D tisku se stále zdokonalují a jsou pro ni vyvíjeny nové materiály, které umožňují tisknout stále složitější, přesnější a pevnější funkční díly.

V průmyslu jsou aditivní technologie nejčastěji využívány pro rychlé prototypování a výrobu náhradních dílů. V medicíně se 3D tisk používá pro výrobu protézy, zubních implantátů a chirurgických nástrojů. V oblasti vzdělávání se stává stále populárnějším nástrojem pro výuku a vizualizaci složitých konceptů.

S ohledem na hlavní myšlenku bakalářské práce nejsou v práci rozebírány jednotlivé aditivní technologie, ale je zde uveden výčet technických materiálů, které jsou dnes běžně zpracovávány 3D tiskem a vždy jen doplněná příslušná technologie 3D tisku. Jednotlivé metody 3D tisku jsou podrobněji rozebrány u použití pro zpracování skla a křemičitých písků. [1]

## 1. 1. Plast

Plast je v současnosti nejpoužívanější materiál v této technologii výroby. Pro tisk se užívají převážně termoplasty, mezi nejnámější patří např. PLA, ABS a PETG. Zastoupeny jsou v oboru 3D tisku také reaktoplasty, a to ve formě pryskyřic vytvrzovaných světlem, tzv. fotopolymery. [2]

Plasty je možné tisknout mnoha metodami. Nejpoužívanějšími jsou:

- FDM/FFF (Fused deposition modeling/Fused filament fabrication) – Nejrozšířenější a nejdostupnější forma 3D tisku (Obr. 1), tryskou je nanášen tavený plast po vrstvách na tiskovou podložku
- SLA (Stereolithography apparatus)
- SLS (Selective laser sintering)
- MLF (Multi Jet Fusion)



*Obr. 1 Nejprodávanejší FFF 3D tiskárna Prusa MK3S+ [3]*

## 1. 2. Kov

V dnešní době je již plně rozvinuta možnost vytvářet kovové díly pomocí 3D tisku. Vyrábí se jak prototypy, tak funkční díly schopné přenášet zatížení srovnatelná s konvenčně vyráběnými díly (slévání, obrábění...). Všechny metody 3D tisku kovů jsou založeny na spékání kovového prášku. Kromě mnoha druhů ocelí je běžné tisknout hliníkové slitiny, titan, nerezová ocel, chrom kobaltové a další slitiny. [4]

- SLM (Selective laser melting) – tavení kovového prášku laserovým paprskem
- DMLS (Direct metal laser sintering) – spékání hranic kovových zrn laserovým paprskem
- EBM (Electron beam melting) – Tavení kovového prášku elektronovým paprskem ve vakuu

## 1. 3. Keramika

3D tisk keramiky umožňuje výrobu tvarově velmi složitých součástí se zachováním vysoké přesnosti. Keramické součásti vytvořené 3D tiskem mají uplatnění především ve zdravotnictví při výrobě dentálních náhrad a implantátů. Díky možnostem tisku mikrostrukturních dílů se zachováním tepelné odolnosti a schopnosti izolovat elektrický proud má 3D tisk keramiky velké využití při výrobě senzorů a čidel ve spalovacích motorech či průmyslových pecích. [5]

- FFF
- SLA

## 1. 4. Sklo a křemičité materiály

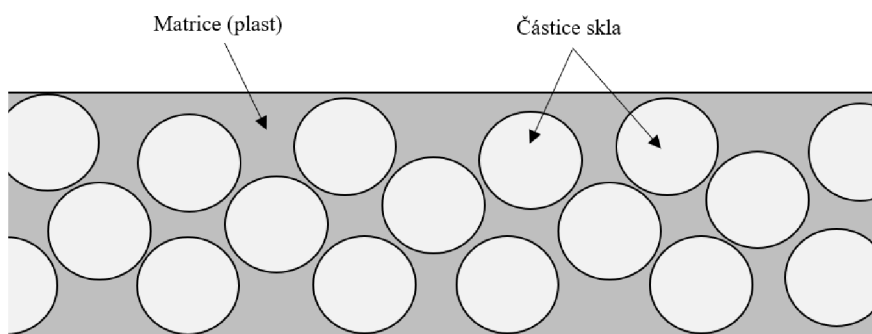
3D tisk skla je oproti tisku standardních materiálů relativně nová technologie, která je celosvětově řešena a stále se potýká s řadou technologických problémů. Hlavním cílem řady výzkumných pracovišť je tisknout transparentní sklo bez bublinek s ohledem na obecné úspory 3D tisku, zejména nižší energetické náročnosti. Zde se jeví zajímavý pohled z hlediska produktové rozličnosti nejen při kusové výrobě, ale také hromadné, především kvůli přicházejícímu trendu tzv. „mass customisation“ (hromadná zakázková výroba). [6, 7]

Značným problémem v oblasti 3D tisku skla je zachování průhlednosti skla po vytištění. Doposud nejlepší výsledky s nejprůhlednějšími výtisky dosáhla technologie G3DP (glass 3D printing), která byla vyvinuta v roce 2015 na MIT (Massachusetts Institute of Technology). [8]

Sklo, a materiály na bázi křemičitých písků různé velikosti středního zrna je možné tisknout následujícími způsoby:

### 1. 4. 1. Tisk skla pomocí filamentu

Při této metodě je využit speciální skelný filament, kterým je díl tištěn stejným způsobem, jako termoplastickými materiály. Filament obsahuje malé částice skla (nejčastěji ve tvaru kuliček) smíchané s polymerem nebo pryskyřicí (Obr. 2), který se ohřívá a tiskne pomocí tiskové hlavy. Po dokončení tisku následuje tepelné zpracování výtisku, při které dojde k vypaření plastové matrice a spečení skelných částic mezi sebou.

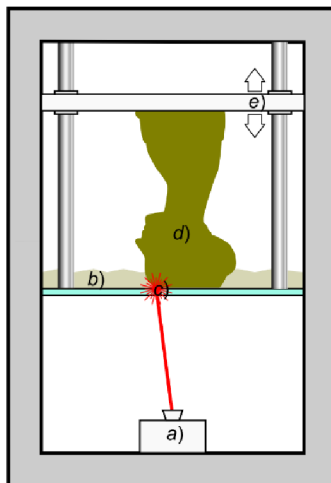


Obr. 2 Filament se skelnými částicemi [vlastní]

U metody FFF se sklo využívá také ve formě skelného vlákna. Při tisku je opět použit plastový filament jako nosič skelné složky, v tomto případě skelného vlákna. Je třeba poznamenat, že zde nejde o přímý 3D tisk skla, ale spíše o použití vlákna pouze pro tvorbu kompozitu, tedy pro zlepšení fyzikálních vlastností plastového výrobku, podobně jako je to u použití uhlíkových vláken. [9]

### 1. 4. 2. Stereolitografie skla (SLA)

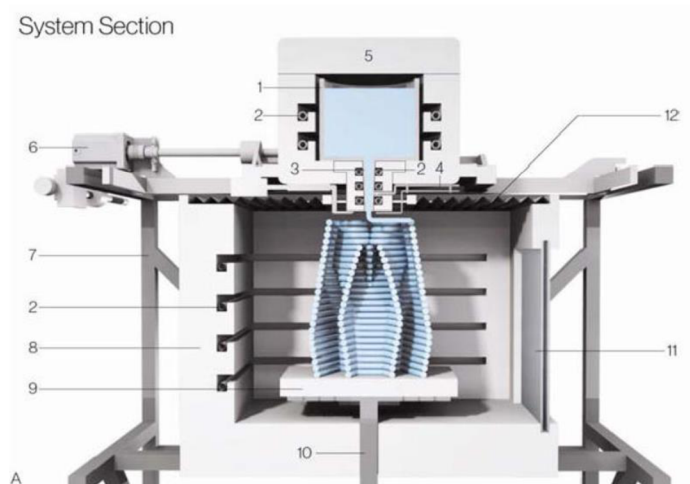
Tento způsob tisku využívá laserového paprsku, který vytvrzuje kapalný skleněný materiál postupným vytvářením vrstev (Obr. 3). Kapalina se skládá z organických molekul a kovových iontů. Při vytvrzování se organické molekuly spojují a polymerizují kovové ionty a tím tvoří tvrdý a průhledný materiál podobný sklu. Pomocí stereolitografie lze vytvářet tvarově složité a přesné součásti s různými optickými vlastnostmi. Nevýhodou proti tomu je vysoká pořizovací cena jak pro zařízení, tak pro samotný materiál. [10]



Obr. 3 Schéma tiskárny SLA – [11]

### 1. 4. 3. Extruzní tisk – G3DP (Glass 3D printing)

Tato metoda umožňuje vytvářet průhledné skleněné díly. Při extruzi dochází k tavení skla a nanášení tryskou na tiskovou plochu ve formě husté taveniny (Obr. 4). Především kvůli vysoké teplotě taveniny není možné přerušit a opět navázat tisk, proto se materiál nanáší do šroubovice kontinuálně, a ne po oddělených vrstvách, jako je tomu při extruzi plastových materiálů. [8]



Obr. 4 Schéma tiskárny G3DP [8]

## 1. 5. Spékání laserovým paprskem (SLM)

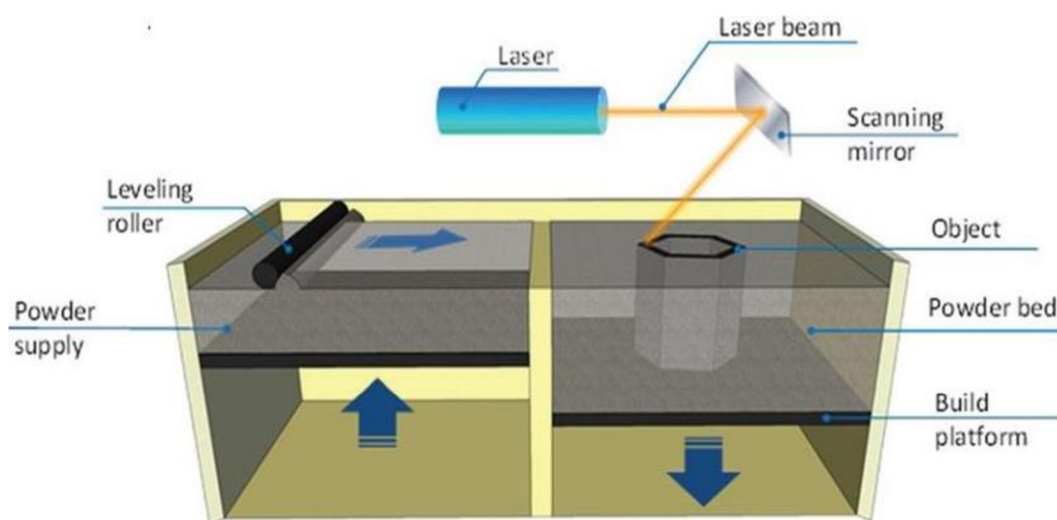
Vzhledem k hlavnímu zaměření bakalářské práce je tato metoda rozebrána podrobněji než metody předchozí, zahrnující nejen popis principu samotného tisku, ale také běžné chyby tisku a parametry nutné k nastavení procesu.

Je důležité zmínit, že tato technologie 3D tisku byla doposud vyvíjena a modifikována výhradně pro zpracování kovových materiálů. Z toho důvodu jsou v této části použity informace právě o zpracování kovových prášků.

### 1. 5. 1. Princip a proces tisku SLM

Metoda SLM bývá často zaměňována s metodou SLS. Princip těchto technologií je velmi podobný, liší se ale teplotou, na kterou laserový paprsek zahřívá práškový materiál. Při tisku metodou SLS (Selective laser sintering) dochází pouze k natavování hranic zrn prášku při cca 95% teploty tání materiálu, tedy k sintrování. Tím vzniká heterogenní struktura a pro dosažení homogennosti je nutné následné tepelné zpracování. [12]

Samotný tisk probíhá postupným nanášením práškového materiálu na tiskovou plochu (Obr. 5), kde dochází k jeho tavení laserovým paprskem do 2D geometrie v dané vrstvě a následně nanesením další vrstvy prášku. Tloušťka vrstvy se při tisku kovů běžně pohybuje v hodnotách 0,02 – 0,1 mm. Nevytvrzený prášek v okolí výsledného dílu je po dokončení tisku přesypán na určené místo. Po smíchání s novým práškem, v daném poměru, je tento práškový materiál použit pro další tisk. [13]



Obr. 5 Schéma SLM tiskárny [14]

Při 3D tisku metodou SLM dochází k úplnému tavení práškového materiálu laserovým paprskem po jednotlivých nanášených vrstvách. Laser tedy musí mít dostatečný výkon pro dosažení vyšší teploty, než je teplota tavení materiálu, a to i při pracovní rychlosti tisku. Z důvodu možné oxidace kovů při zahřátí na tuto teplotu je nezbytné vyplnit tiskovou komoru ochrannou atmosférou, zejména argonem (při tisku titanu) a dusíkem (pro ostatní materiály, např. ocelí, hliníkových slitin atd.). [15]

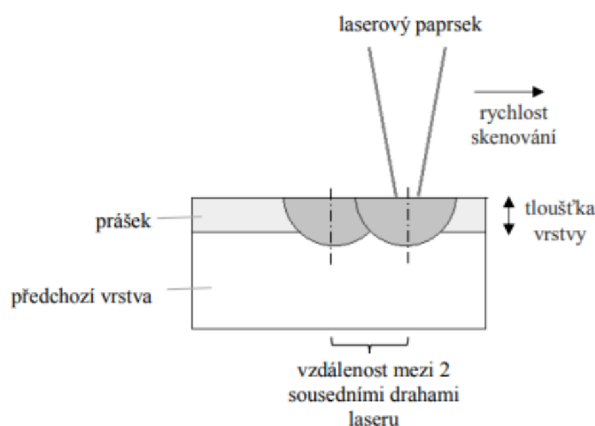
Výsledkem mohou být geometricky složité tvary i mikrostrukturní detaily. Díky úplnému roztavení vzniká výrobek s homogenní strukturou bez tzv. studených spojů mezi vrstvami a následné tepelné zpracování je používáno pouze pro redukci vnitřního napětí materiálu, nikoliv pro dosažení homogenity struktury dílu. Lze tedy využít pouze tepelné zpracování v nižších teplotách. [13]

### 1. 5. 2. Procesní parametry tisku SLM

Parametry SLM 3D tisku zahrnují několik klíčových faktorů, které ovlivňují výslednou kvalitu tisku a zajistí správné tavení materiálu (Obr. 6). Hlavními parametry tisku jsou tloušťka vrstvy materiálu, výkon laseru, rychlost pohybu paprsku a vzdálenost mezi sousedními drahami laseru. Z těchto veličin je možné vypočítat potřebnou energii  $E$  pro požadované tavení práškového materiálu pomocí následujícího vztahu:

$$E = \frac{P}{s \cdot v \cdot t} [J * mm^{-3}],$$

kde  $P$  je výkon laseru,  $s$  je vzdálenost mezi sousedními drahami paprsku,  $v$  je rychlost posuvu laseru a  $t$  je tloušťka vrstvy. Dalším důležitým parametrem je teplota komory tiskárny při procesu tisku a již zmíněná ochranná atmosféra zabraňující oxidaci při tavení kovů. [13]



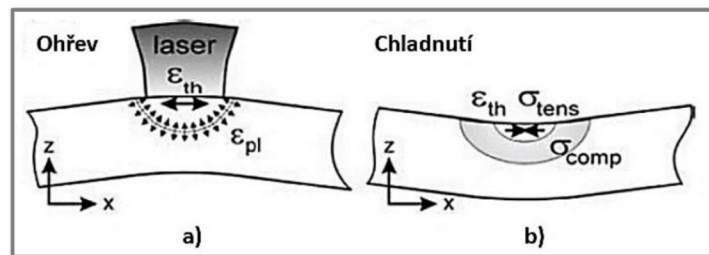
Obr. 6 Procesní parametry tisku [13]

Pro dosažení vyšší efektivity a redukce času samotného tisku je u zařízení pro SLM tisk zpravidla použito více laserových paprsků. V tomto případě je možné nastavit u každého laseru rozdílný výkon pro různé operace tisku, tedy využít jeden z paprsků pro tavení hranice objektu, kde je žádoucí vyšší výkon, a další například pro výplně objektu.

### 1. 5. 3. Chyby tisku SLM

Stejně jako u všech ostatních metod 3D tisku, dochází při samotném procesu k nedokonalostem ve struktuře výsledného produktu. Tyto defekty vznikají především v důsledku tavení materiálu za vysokých teplot a jeho následného, náročně kontrolovatelného, chladnutí.

Jedním z defektů, vznikajících při chladnutí materiálu, jsou trhliny. Ty se tvoří kvůli vzniku zbytkových napětí ve vrchní vrstvě. Výrobek má tendenci se po ochladnutí smršťovat v důsledku rapidního snížení teploty po skončení působení laserového paprsku (Obr. 7). Vzniku zbytkových napětí ve výrobku je možné předejít předehřevem tiskové komory nebo částečně i následným tepelným zpracováním.



Obr. 7 Zbytkové napětí vzniklé při chladnutí [16]

Dalším častým defektem je pórovitost. Jedná se o drobné póry o velikostech menších než 0,1 mm. Vznikají při procesu tisku, pokud použitý práškový materiál nemá dostatečně vysokou hustotu a obsahuje mezi částicemi prášku i plynové kapsy. Tento plyn poté při zahřátí prášku vystupuje ke stěně výrobku a při tuhnutí dojde k zachycení plynu a vzniku pórů. [13, 16]



## 2. Možnosti konstrukce svislého posuvu PBF tiskáren

S ohledem na zadání práce jsou v této kapitole představena různá provedení svislé osy u 3D tiskáren na principu SLM, ale i SLS, DMLS, EBM a MJF, které jsou všechny založeny na přesunu práškového tiskového materiálu ve svislém směru. Jednotlivá provedení se liší především vstupním materiálem, velikostí tiskové plochy a způsobu umístění zásobníku práškového materiálu.

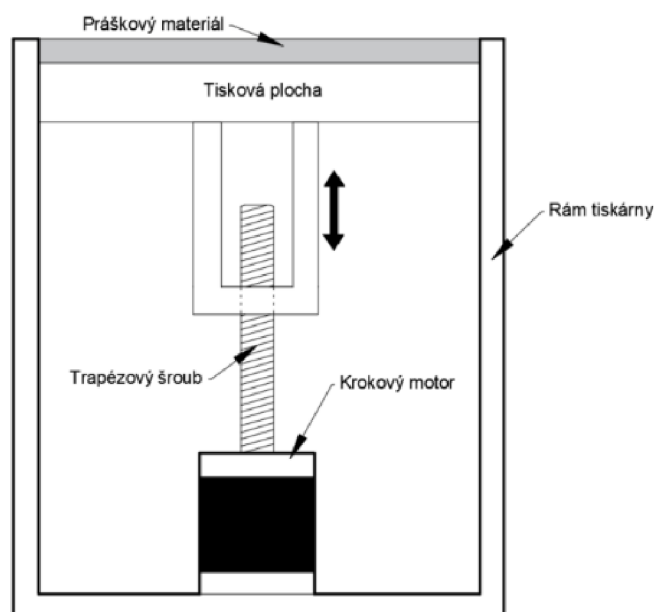
### 2. 1. Uchycení pohonu

Vzhledem k požadované přesnosti výšky vrstvy a tím i chodu samotného motoru, využívají všechny zmíněné typy 3D tiskáren krokové motory. Ty se liší velikostí a požadovaným výkonem podle hmotnosti tiskového stolku a množství materiálu na něm.

Informace o způsobu provedení posuvu svislé osy, uváděné v této kapitole, byly získány formou konzultací a pozorováním těchto tiskáren v laboratoři 3D tisku v budově CxI na TUL. Zde jsem měl možnost získat informace o provedení svislého posuvu u průmyslových 3D tiskáren na principu PBF.

#### 2. 1. 1. Motor uchycený k rámu tiskárny

První možností provedení je umístit krokový motor pod tiskový prostor a uchytit jej pevně k rámu tiskárny (Obr. 8). Při tomto řešení se tedy pohybuje tisková plocha s maticí, která se svisle posouvá po rotujícím šroubu.



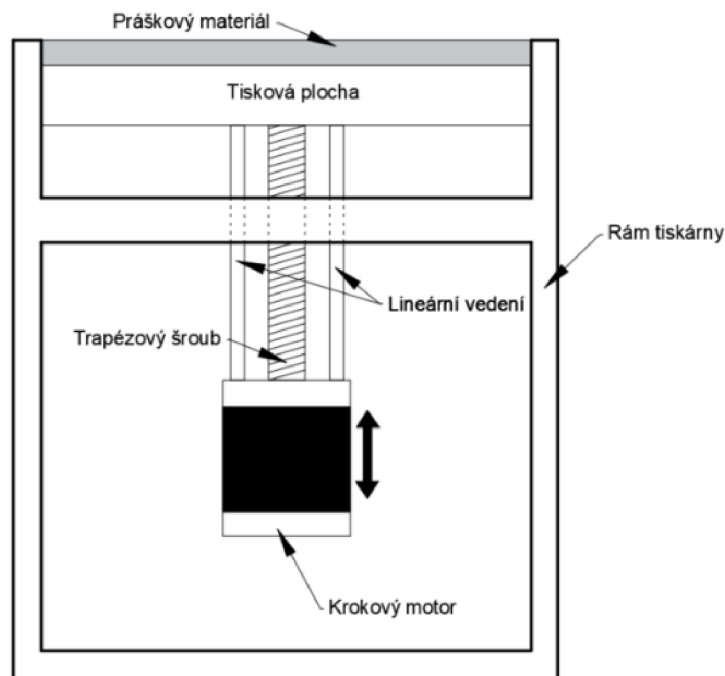
Obr. 8 Motor uchycený k rámu tiskárny [vlastní]

Tento způsob je využíván společností SLM Solution u jejich tiskáren na kovové materiály. Zde je použit krokový motor se schopností přenášet velké axiální síly, z důvodu vysoké hmotnosti práškového materiálu v tiskovém prostoru. Hmotnost prášku při plném tiskovém prostoru (u tiskárny SLM 280 HL) dosahuje 130 kg.

Výhodou tohoto uchycení motoru je jednoduchá konstrukce s použitím malého množství komponent. Oproti tomu ale musí krokový motor zvládat vysoké axiální síly vlivem tíhy tiskového materiálu.

### 2. 1. 2. Motor uchycený k tiskové ploše

Dalším provedením je uchycení motoru k tiskové ploše pomocí vodicích tyčí (Obr. 9). Ty jsou pevně uchyceny ke krokovému motoru na jedné straně a na druhé k tiskové ploše zajištěné kluznými pouzdry uchycenými v rámu tiskárny. Kromě pouzder je k rámu pevně přichycena i matice pro šroub zajišťující posuv. Šroub je možné na jeho horním konci uchytit do tiskového stolku pomocí ložiska či kluzného pouzdra, nebo jej zakončit letmo pod úrovní stolku. I když toto provedení není nejjednodušší z hlediska množství použitých dílů, jedná se o nejpoužívanější a využívají ho například tiskárny Sinterit Lisa či tiskárny vyráběné společností Epson.

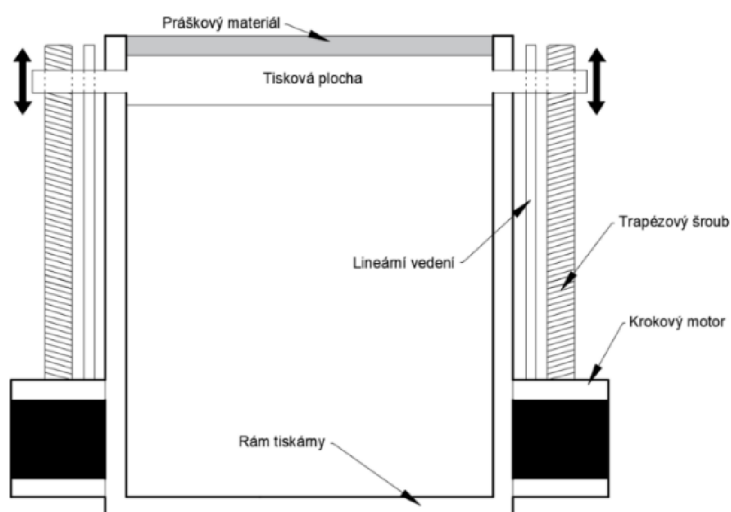


Obr. 9 Motor uchycený k tiskové ploše [vlastní]

Výhodou tohoto provedení je, že nedochází k axiálnímu zatížení motoru a toto zatížení je přeneseno skrz matici do rámu tiskárny.

### 2. 1. 3. Motor uchycený ze stran tiskového prostoru

Zcela odlišné řešení je umístění krokových motorů i vodicích tyčí ze stran tiskové plochy (Obr. 10). Volbou tohoto provedení se nabízí možnost využití prázdného prostoru pod tiskovou plochou. U tiskárny HP Multi Jet Fusion je tento prostor vyplněn zásobou práškového materiálu, který je pro dávkování na tiskovou plochu dopravován Archimedovými šrouby, kde je následně roztírán stěrkou po tiskové ploše.



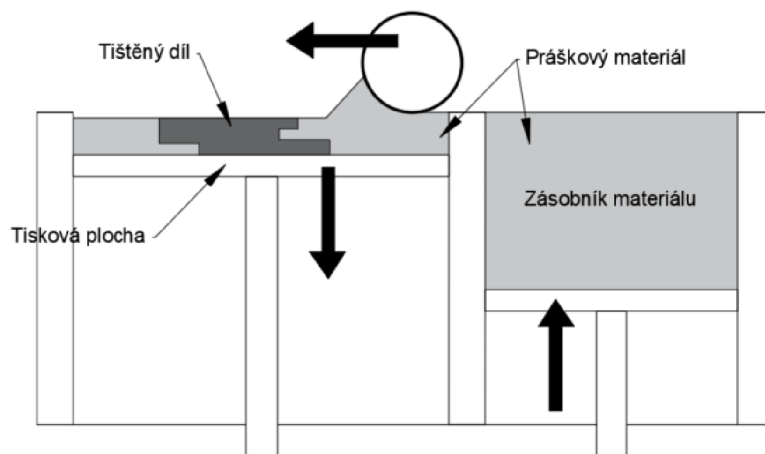
Obr. 10 Pohon umístěný vedle stolku [vlastní]

Výhodou tohoto uspořádání je možnost využití prostoru pod tiskovou plochou, například pro zásobník práškového materiálu. Provedení je ale náročnější z důvodu nutnosti použití více krokových motorů a vodicích tyčí proto, aby nedošlo ke vzpříčení tiskové plochy se stěnou tiskárny.

## 2. 2. Dávkování sypkého materiálu

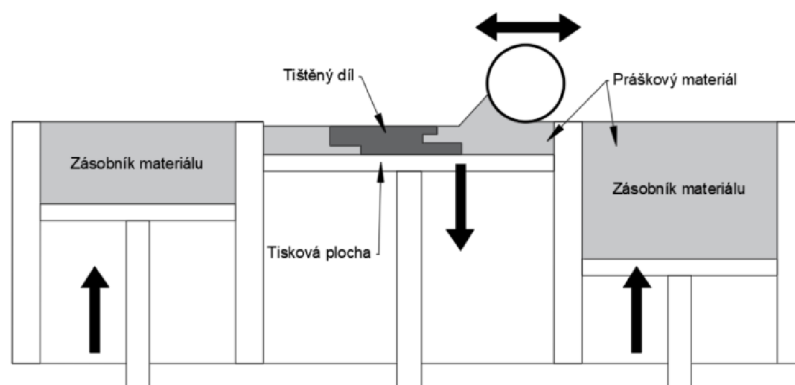
### 2. 2. 1. Druhým svislým posuvem

U komerčních tiskáren existují dva způsoby dodávání práškového materiálu na tiskovou plochu. Nejčastěji je tomu ze zásobníku umístěného paralelně s tiskovým prostorem a materiál je nanášen na tiskovou plochu stěrkou či válečkem (Obr. 11). Zásobník je, stejně jako tisková plocha, poháněn krokovým motorem ve svislém směru. Zásobník příslušného materiálu může být umístěn vedle tiskové plochy v kombinaci s přepadovou nádobou na druhé straně, kdy dávkovací stěrka či váleček dodávají materiál vždy jedním směrem a přebývající prášek padá do nádoby na druhé straně.



Obr. 11 Dávkování materiálu pomocí druhého stolku [vlastní]

Další možnost provedení je umístění dvou zásobníků materiálu z obou stran tiskové plochy (Obr. 12). Při tomto provedení je materiál nanášen, zpravidla válečkem, oběma směry a druhý zásobník vždy pojme přebytečný prášek a při dalším cyklu je použit při nanášení nové vrstvy.

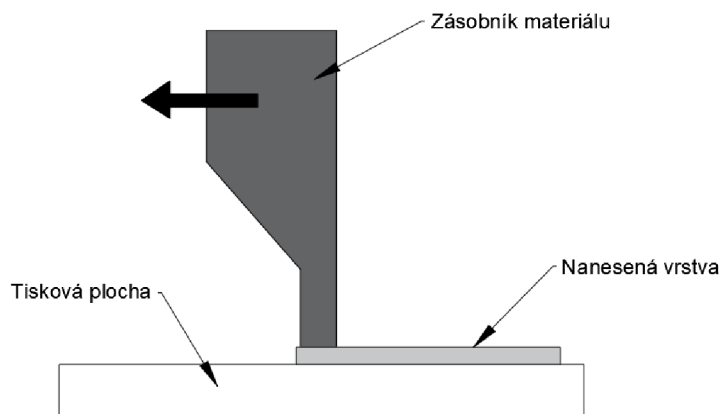


Obr. 12 Dávkování materiálu pomocí dvou zásobníků [vlastní]

### 2. 2. 2. Násypkou Dávkování materiálu pomocí dvou zásobníků

Druhým způsobem je dávkování materiálu z násypky umístěné nad úrovní tiskového prostoru (Obr. 13). Při posuvu násypky dochází ke spádu materiálu na tiskovou plochu. Součástí spodní části násypky je roztírací břit, často ze silikonu nebo kovu, který rozprostírá práškový materiál po tiskové ploše.

Při použití této varianty dávkování sypkého materiálu je nutné velké množství prostoru nad tiskovou plochou. Oproti tomu je ale možné zvětšit tiskovou plochu díky umístění tiskového materiálu nad ni.



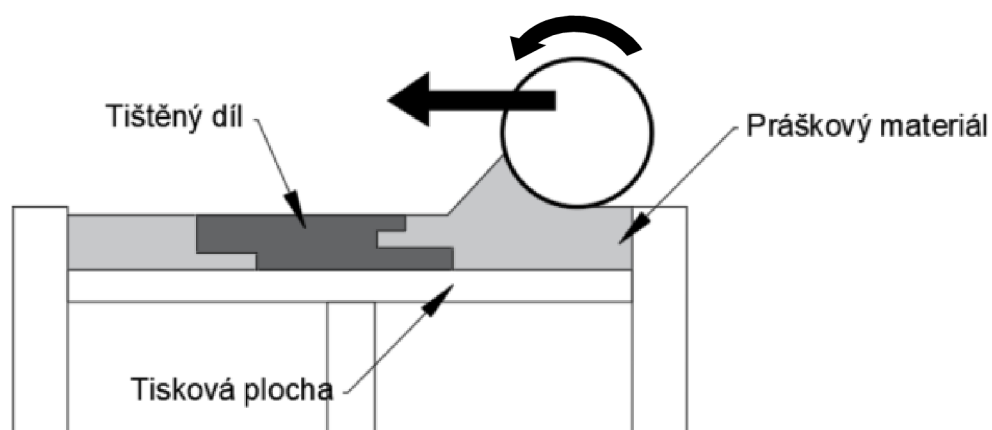
Obr. 13 Dávkování materiálu násypkou [vlastní]

## 2. 3. Pěchování práškového materiálu

Při tisku kovových prášků metodou SLM, díky vysoké hustotě kovů, není zapotřebí dále materiál stlačovat (pěchovat). V případě volby skelných mikromletých písků a dalších materiálů s nízkou hustotou je však nutné hutnění prášku zajistit pro kvalitní výsledky tisku bez vzduchových bublin ve výrobku.

### 2. 3. 1. Pěchování dávkovacím válečkem

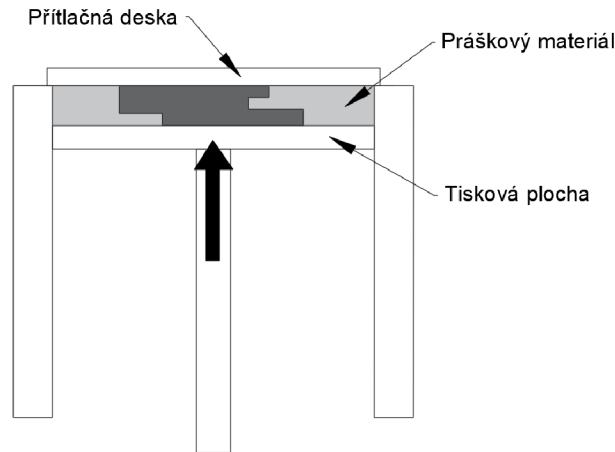
Prvním a nejrozšířenějším řešením pěchování práškového tiskového materiálu je přitlačování dávkovacím válečkem (Obr. 14). K tomu dochází pouze při sousledném pohybu válečku, tedy při jeho odvalování po práškovém materiálu. Při tomto řešení je nutné zajistit rotaci válečku po nanášené vrstvě a dostatečně tuhé uložení pro vyvození požadovaného tlaku.



Obr. 14 Pěchování prášku válečkem [vlastní]

### 2. 3. 2. Pěchování motorem tiskové plochy

Druhou možností je využití síly krokového motoru, který pohání tiskovou plochu, k pěchování materiálu o dorazovou desku umístěnou nad tiskový prostor (Obr. 15). Při použití materiálu s nízkou hustotou je možné využít dorazové desky nejen k samotnému pěchování, ale také k odečítání hodnoty tlaku použitého při přitlačování krokovým motorem.



Obr. 15 Pěchování pomocí krokového motoru [vlastní]

### 2. 4. Těsnění tiskového prostoru

S ohledem na vlastnosti použitého materiálu je ve většině případů zapotřebí utěsnit okolí tiskové plochy proti možnému zapadávání prášku pod tiskovou plochu. Zde by mohlo dojít k zadření lineárního vedení svislého posuvu nebo k poškození krokových motorů. Z tohoto důvodu je obvod tiskové plochy utěsněn proti prostupu těchto drobných částic.

Pro utěsnění prášku proti propadu pod tiskovou plochu je běžně používáno pryžové nebo filcové těsnění. Filcové těsnění je použito např. u tiskáren firmy SLM Solution pro tisk kovu, kde jsou rohy tiskové plochy zaobleny a filcový pás je obehnán po stranách tiskové plochy.

## 2. 5. Požadované vlastnosti navrhovaného zařízení

### 2. 5. 1. Laserové zařízení

Pro realizaci experimentů a oživení zhotoveného zařízení v této bakalářské práci byl určen CO<sub>2</sub> laserový plotr (Obr. 16) o výkonu 40 W. Laserový paprsek z CO<sub>2</sub> laserů se pohybuje ve vlnové délce 10 mikrometrů, což je žádoucí hodnota pro zpracování skelných materiálů. V tomto světelném spektru již není sklo transparentní a laser se o zrna skla zastaví a roztaví je. V případech ostatních laserů dojde pouze k průniku paprsku sklem, nikoliv k narušení materiálu.

Navrhované konstrukční zařízení v bakalářské práci, pracující na systému SLM, bude zabudované do vnitřního prostoru laserového plotru, tudíž je za potřeby navrhované zařízení uzpůsobit jeho rozměry.



*Obr. 16 Laserový plotr [17]*

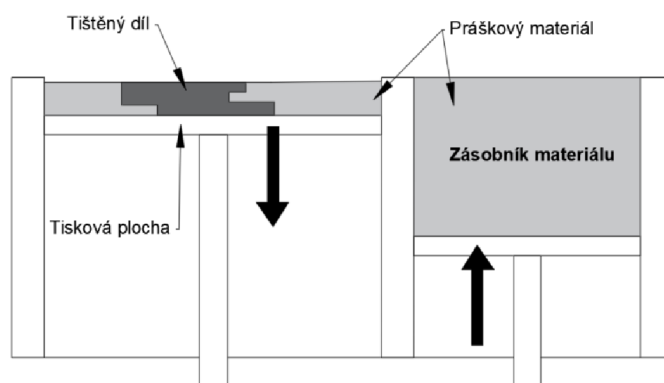
### 2. 5. 2. Tiskový práškový materiál

Navrhované konstrukční zařízení je určeno pro tisk křemičitých mikromletých písků a skelných bílých sazí. Práce s těmito materiály je pro přesné dávkování a manipulaci obtížná, především z důvodu nízké hustoty materiálu. Právě kvůli nízké hustotě bude nezbytné materiál pěstovat na tiskovou plochu.

Dalším důležitým parametrem použitých křemičitých prášků je jejich malá zrnitost. Velikost středního zrna se u analyzovaných mikromletých křemičitých písků pohybovala od 6 do 27  $\mu\text{m}$  a byly testovány i bílé saze na bázi SiO<sub>2</sub> Degusa 7  $\mu\text{m}$ . Z toho důvodu je zapotřebí vhodným způsobem utěsnit tiskovou plochu i zásobník materiálu.

## 2. 6. Volba vhodného provedení

Koncepční návrh zařízení, který vzešel na základě podrobné rešeršní analýzy, a následné zhotovené konstrukční řešení je především limitováno dostupným vnitřním prostorem laserového plotru. Z toho důvodu byla zvolena varianta dávkování prášku pomocí svislého zásobníku, nikoliv násypkou nad tiskovou plochou (Obr. 17).



Obr. 17 Zásobní prášku paralelně s tiskovou komorou [vlastní]

Tiskovou plochu i zásobník práškového materiálu je nutné posouvat ve svislém směru. S ohledem na dostupný prostor a velikost tiskové plochy není žádoucí aplikovat uchycení krokových motorů a vodicích tyčí ze stran stolků. Nabízí se tedy první dvě řešení uchycení motorů pod stolky, a to pevně k rámu tiskárny (Obr. 8) nebo pevně k pohybujícím se stolům (Obr. 9).

Vzhledem k nízké hustotě použitého materiálu, je nezbytné nanášený materiál pýchovat. Na základě provedených počátečních experimentů, které byly realizovány v bakalářské práci kolegy F. Švejcara [18], bylo jako vhodné provedení zvoleno dávkování plastovou stírací lištou a jeho pýchování na přítlačnou deskou (Obr. 18, 19), především z důvodu ulpívání práškového materiálu na povrchu válečků různých materiálů.



Obr. 19 Bílé saze po rozetření plastovou deskou [18]



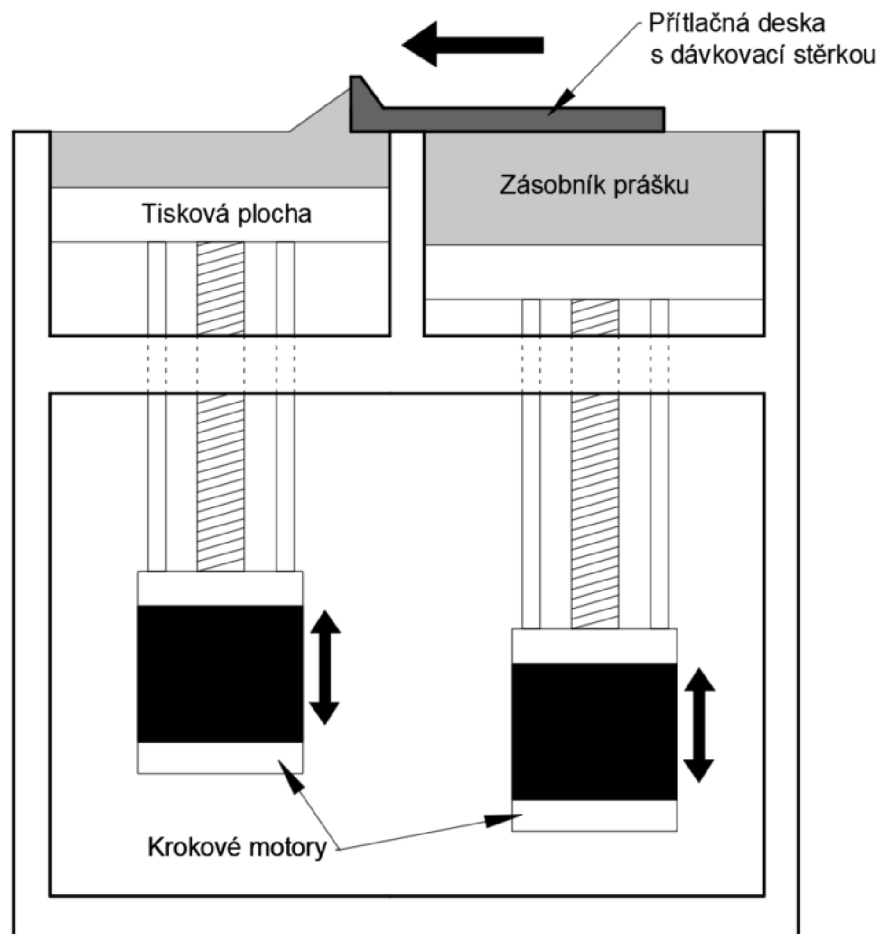
Obr. 18 PA váleček po rozetření bílých sazí [18]



U varianty pēchování válečkem by bylo také nutné zajistit jeho rotaci (odvalování), tím by bylo konstrukční řešení složitější než u použití přitlačné desky.

Výhodou přitlačné desky je to, že práškový materiál je stlačován v celém jeho objemu najednou. Je také možné odečítat tlak, kterým krokový motor působí na práškový materiál. Pēchovací tlak je jedním z parametrů, které bude nutné během experimentů zohledňovat a také jej dostatečně přesně měřit.

Na základě zvolené varianty dávkování materiálu se zakomponováním pēchování proti přitlačné desce bude docházet k axiálnímu zatížení krokového motoru. Proto není žádoucí uchytit krokové motory pevně k rámu, kde by k tomuto zatížení docházelo, ale pevně k tiskové ploše. Toto provedení je vhodné především pro pohon tiskové plochy, nicméně z důvodu co největší jednoduchosti a zaměnitelnosti jednotlivých dílů konstrukce, byl zvolen tento způsob uchycení pohonu i pro zásobník práškového materiálu. Volbou způsobu provedení těchto dílčích částí vznikl kompletní koncepční návrh (Obr. 20).



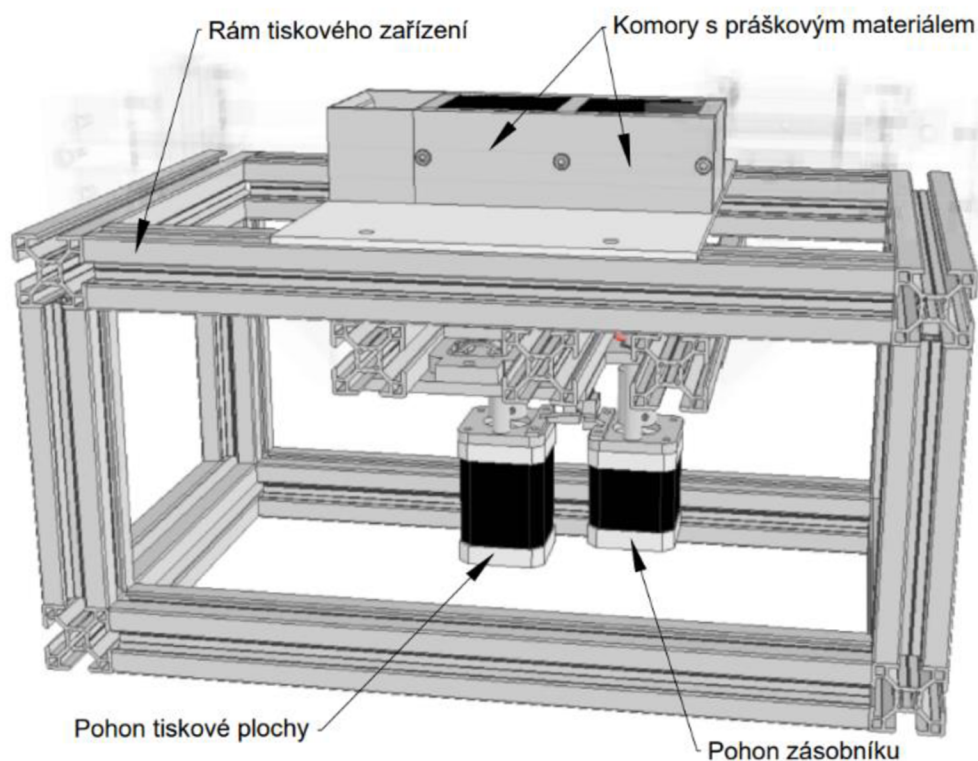
Obr. 20 Schéma zvoleného provedení [vlastní]

### 3. Konstrukční řešení svislé osy 3D tiskárny

Na základě zhotoveného koncepčního návrhu, který byl podložen rešeršní činností a ověřovacími experimenty v práci kolegy F. Švejcara [18], byl zhotoven konstrukční návrh svislé osy experimentálního zařízení. S ohledem na řadu proměnlivých technologických parametrů vstupního materiálu je vhodné, aby výsledné zařízení bylo jednoduše modifikovatelné při případných nutných úpravách na základě výsledků experimentů.

Konstrukční návrh byl rozdělen do 4 hlavních částí:

- Rám tiskového zařízení
- Komory s práškovým materiálem
- Pohon tiskové plochy
- Pohon zásobníku materiálu

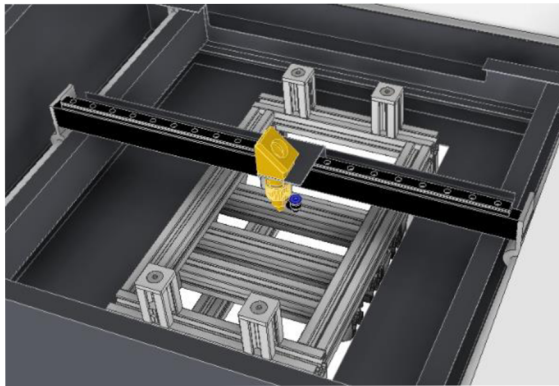


*Obr. 21 Rozdělení konstrukčních částí [vlastní]*

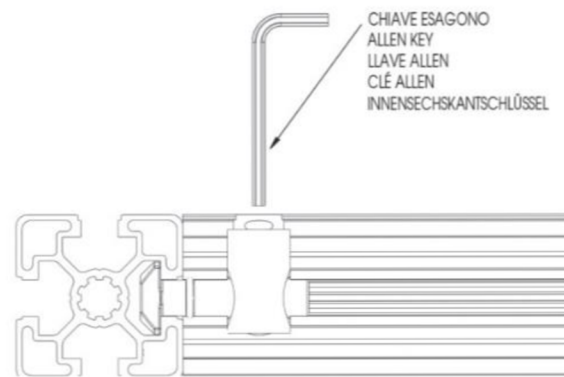
Kromě výše uvedených hlavních částí konstrukce (Obr. 21) jsou v této kapitole uvedeny také další nezbytné části, jako těsnění vertikálně pohyblivých stolců, zajištění pýchování materiálu a ovládání celého mechanismu s krokovými motory.

### 3. 1. Rám tiskového zařízení

Rám tiskového zařízení vznikl prvotně pro realizaci, již zmíněné, bakalářské práce kolegy F. Švejcara [18]. V předložené bakalářské práci byl rám rozšířen o další úchytné prvky, především o nosné desky pro uchycení celé sestavy posuvu svislých pohyblivých stolků.



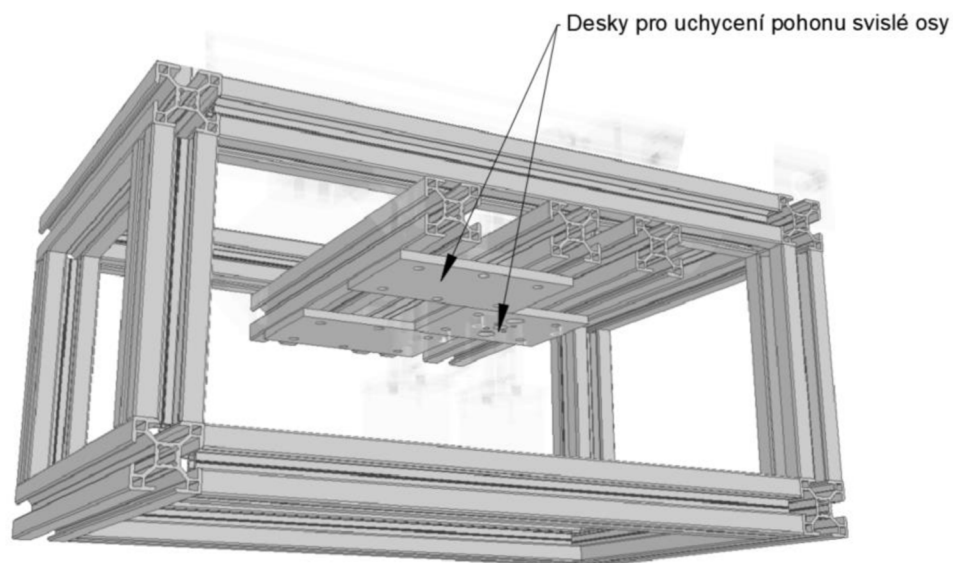
Obr. 22 Rám zařízení v laserovém plotru [vlastní]



Obr. 23 Al profil se závitovými spojkami [19]

Provedená koncepce a následný konstrukční návrh nosného rámu byly limitovány rozměry laserového zařízení, proto byl vytvořen 3D CAD model laserového plotru (Obr. 22). 3D model CO<sub>2</sub> laseru obsahuje všechny důležité části, včetně laserového zařízení a jeho pohonu. Tvorba virtuálního modelu byla realizována v programu Inventor Professional.

Pro celou konstrukci rámu SLM zařízení byly zvoleny extrudované hliníkové profily s označením BH30-8, 30x30mm. Tyto profily jsou navzájem spojeny vnitřními závitovými konektory (Obr. 23). Pro uchycení trapézových matic a kluzných pouzder vodicích tyčí pro svislý posuv jsou k extrudovaným profilům upevněny duralovým deskám (Obr. 24).

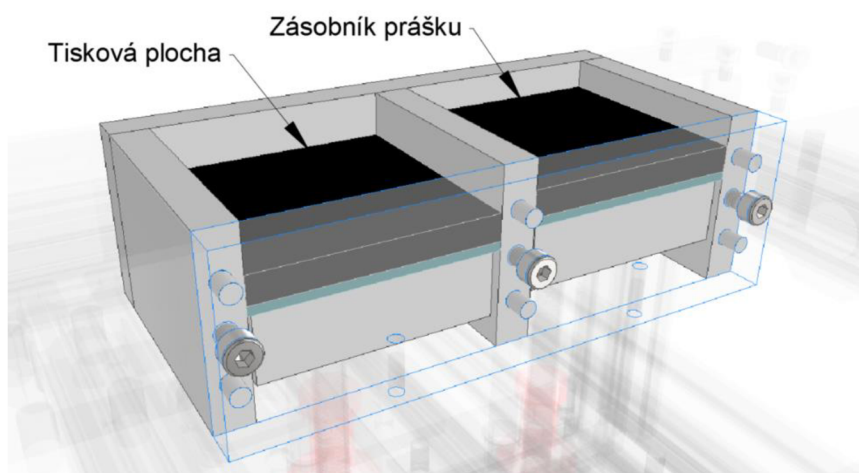


Obr. 24 Rám tiskového zařízení [vlastní]

### 3. 2. Komory s práškovým materiálem

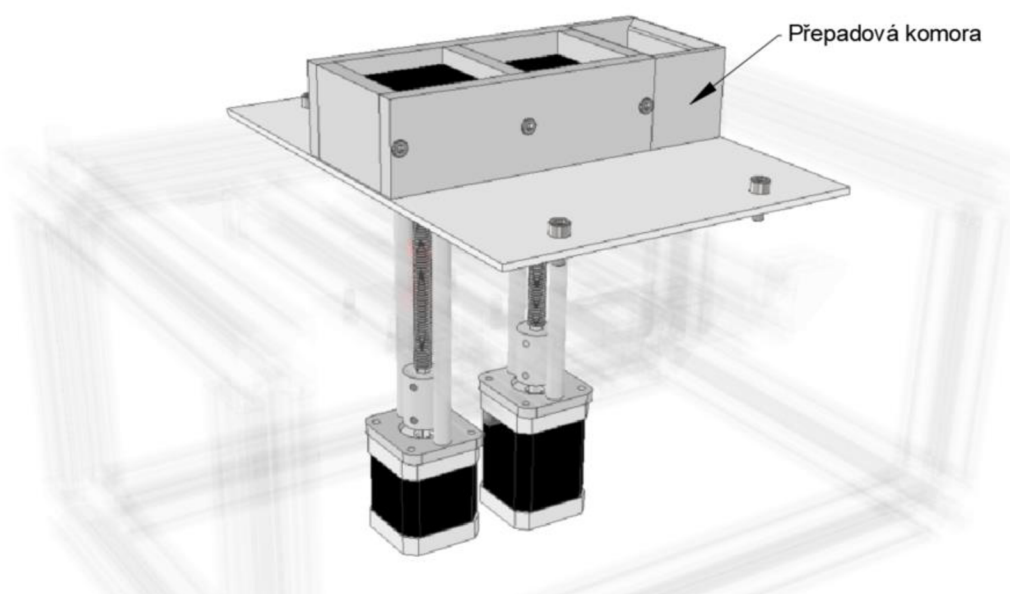
S ohledem na dostupný prostor vymezený laserovým plotrem a následně i rámem zařízení byla zvolena velikost tiskové plochy a také plochy dávkovače na 52x52mm. Volba větší tiskové plochy by také vyžadovala znatelně větší vyvinutý moment krokovým motorem pro dosažení stejného přítlačného tlaku na práškový materiál.

Konstrukční návrh obou komor a postup montáže pro práškový materiál byl rovněž zmíněn v bakalářské práci kolegy F. Švejcara [18].



Obr. 25 Tisková komora a zásobník prášku [vlastní]

Pro případný přebytek práškového materiálu při dávkování stěrkou na tiskovou plochu byla umístěna přepadová komora pro zachycení tohoto prášku (Obr. 26).



Obr. 26 Umístění tiskové plochy a zásobníku v rámu [vlastní]

### 3. 3. Pohon svislé osy

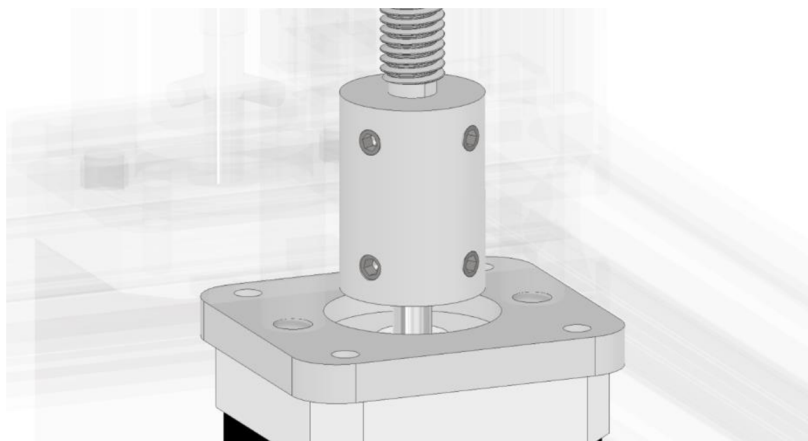
#### 3. 3. 1. Krokové motory

Pro zajištění posuvu tiskového stolku a zásobníku materiálu byly vybrány krokové motory NEMA 17. Ty jsou dodávány v různých provedeních, které se liší velikostí a tím i svým výkonem. Pro posuv tiskové plochy byl zvolen větší motor s označením 59 mm (výška motoru), který je schopen vyvinout krouticí moment až 0,65 Nm. Pro posuv zásobníku práškového materiálu byl zvolen menší motor s výškou 47 mm (Obr. 27).



*Obr. 27 Krokový motor NEMA 17, 47 mm [20]*

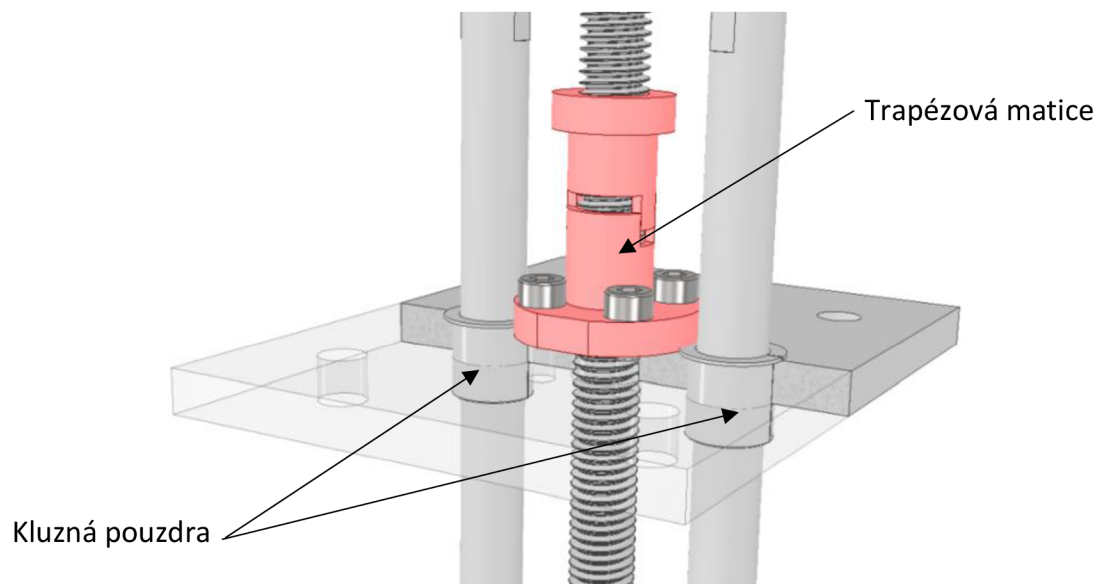
Oba motory jsou schopny dosáhnout přesnosti mikro krokování až 200 kroků za otáčku. Při volbě vysoké přesnosti kroku však klesá maximální krouticí moment, který dokáže motor vyvinout. Proto bude nutné tyto hodnoty vhodně nastavit na základě provedených experimentů.



*Obr. 28 Spojení hřídele motoru s trapézovým šroubem [vlastní]*

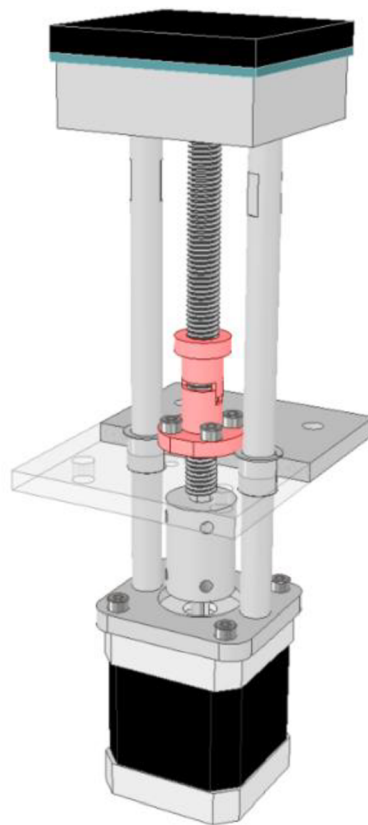
Rotační pohyb motorů je převeden na posuv obou vertikálně pohyblivých stolků za pomoci trapézových šroubů, běžně dostupných na trhu příslušenství 3D tiskáren. Na základě parametrů a rozměrů motoru byl zvolen trapézový šroub T8. Pro spojení šroubu s krokovým motorem byla zvolena hřídelová nepružná spojka (Obr. 28). Nebylo žádoucí použít pružnou hřídelovou spojku z důvodu možných komplikací při přitlačování práškového materiálu.

### 3. 3. 2. Uchycení vodících tyčí a matic



Obr. 29 Uchycení kluzných pouzder a matice [vlastní]

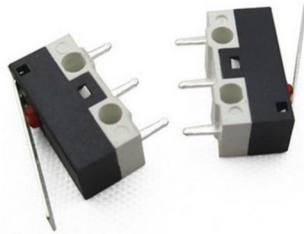
Vzhledem ke zvolenému uchycení krokových motorů je matice uchycena, pomocí spojovací desky, k rámu tiskového zařízení. V této desce jsou umístěna také kluzná pouzdra pro zajištění vodících tyčí (Obr. 29, 30).



Obr. 30 Sestava posuvu zásobníku prášku [vlastní]

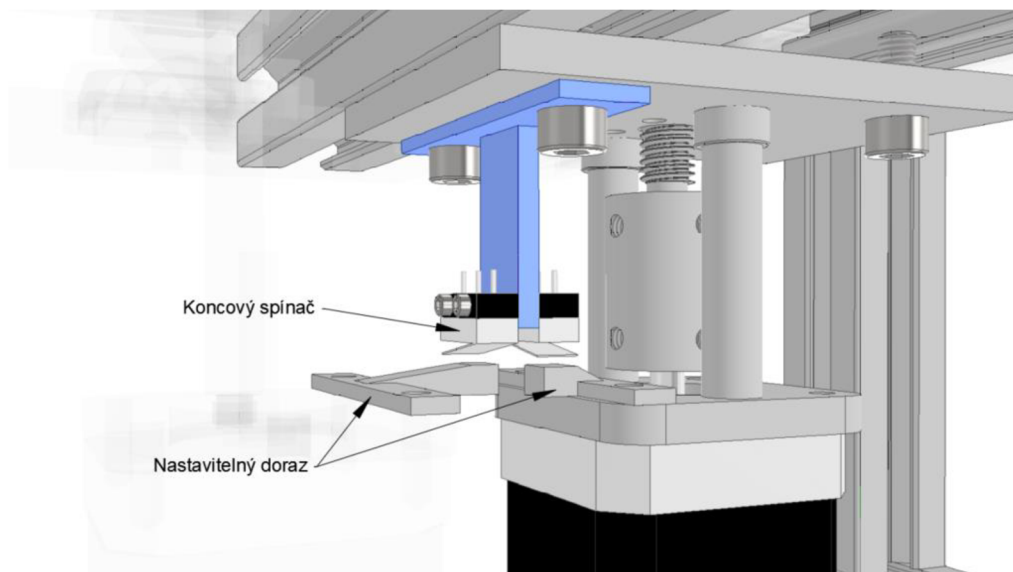
### 3. 3. 3. Doraz svislého posuvu

Pro správnou funkčnost celého zařízení bylo nezbytné zakomponování dorazů svislého pohybu. Horní doraz je zajištěn mechanicky, a to koncovým pákovým spínačem (Obr. 31), umístěným pevně k rámu pomocí spojovacího dílu vyrobeného metodou 3D tisku z plastu. K tomuto dílu



Obr. 31 Koncový spínač pákový [21]

jsou pomocí šroubů připevněny koncové spínače. Pozici tohoto dorazu je možné upravovat pomocí nastavitelného dorazového dílu uchyceného ke krokovému motoru (Obr. 32). Díky aplikaci 3D tisku jej lze jednoduše nahradit novým dílem s jinými rozměry, nebo jej v místě uchycení šrouby podložit distančními podložkami.



Obr. 32 Uchycení koncových spínačů [vlastní]

Tento doraz je primární vzhledem k nastavování výchozí (nulové) polohy obou stolků. Zajištěním přesného umístění dorazu je zajištěno také správné nastavení tloušťky první nanesené vrstvy. K sepnutí spínače tedy musí dojít při nejvrchnější pozici tiskové plochy, kde je její horní hrana zároveň s horní hranou bočních desek tiskové komory.

Spodní doraz je zajištěn softwarově a lze jej měnit podle požadavků při experimentech přímo v programu.

### 3. 4. Pěchování materiálu

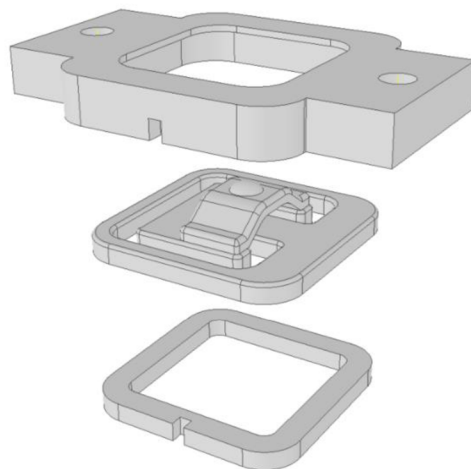
Mezi hlavní technické požadavky na navrhované zařízení patří nutnost pěchování materiálu z důvodu nízké hustoty mikromletých prášků a bílých sazí. Jako vhodné řešení byla zvolena přítlačná deska umístěná nad úroveň tiskové plochy.

Pro měření přítlačné síly byly implementovány váhové senzory HX711 (Obr. 33), které fungují na principu tenzometrického můstku. Tento způsob měření dosahuje přesnějších hodnot než při odečítání přítlačné síly pomocí momentového zatížení krokového motoru.



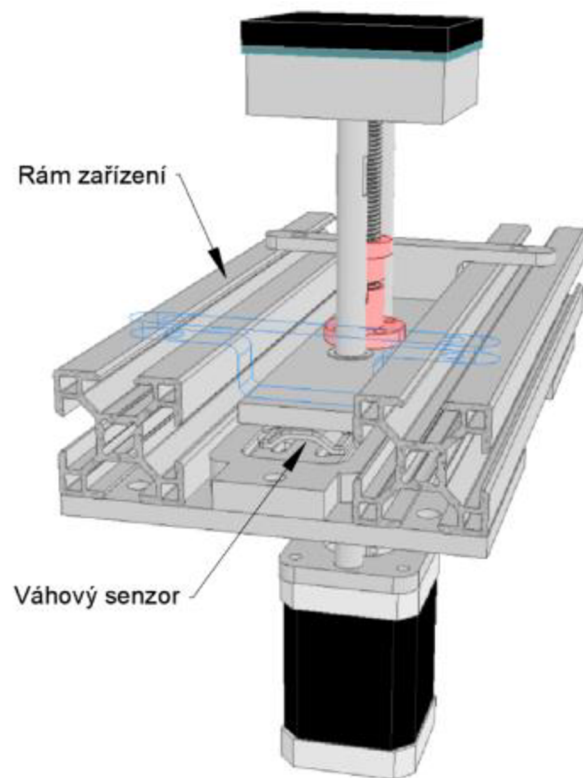
*Obr. 33 Váhový senzor HX711 [22]*

Váhové senzory jsou uchyceny pevně k rámu tiskárny pomocí dvoudílných upevňovacích domečků, které zajistí přesnou pozici senzoru (Obr. 34). Na jejich spodní straně jsou uchyceny k desce rámu a vrchní strana senzoru je stlačována deskou s trapézovou maticí, která je na ně přítlačována trapézovým šroubem a krokovým motorem (Obr. 35).



*Obr. 34 Domeček váhového senzoru [vlastní]*

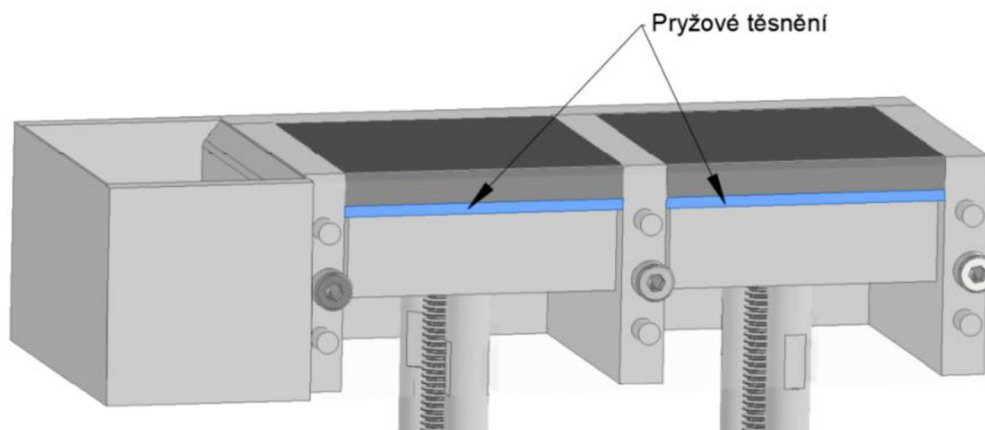




Obr. 35 Sestava s umístěním váhových senzorů [vlastní]

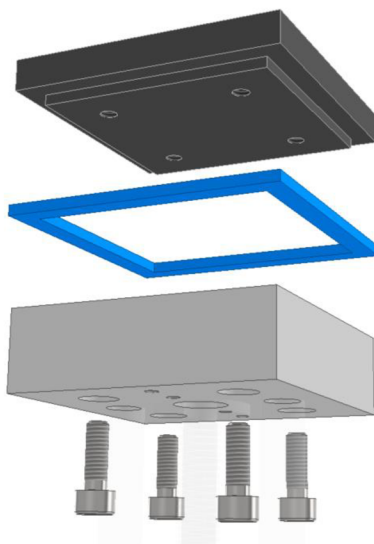
### 3. 5. Těsnění tiskového prostoru

Z důvodu malých rozměrů velikosti středního zrna analyzovaných křemičitých prášků je nezbytné zajistit, aby zrna nepropadávala pod tiskovou plochu a neznečišťovala vedení krokových motorů, kde by mohlo dojít k zadření vodících tyčí či šroubu. Proto je okolí tiskové plochy opatřeno pryžovým těsněním (Obr. 36, 37).



Obr. 36 Pryžové těsnění práškových komor [vlastní]

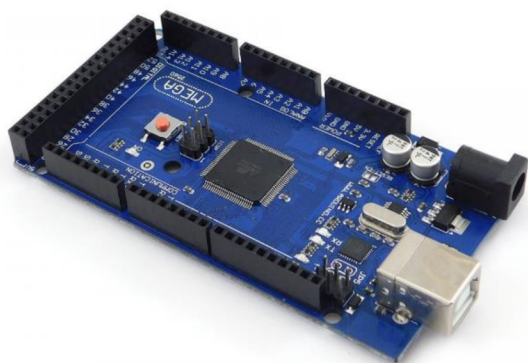
Pryžové těsnění oproti filcovému lze použít ve formě plochého čtvercového tvaru, který je jednoduchý k upevnění. Oproti tomu filcové těsnění by bylo nutné lepit na obvod tiskové plochy.



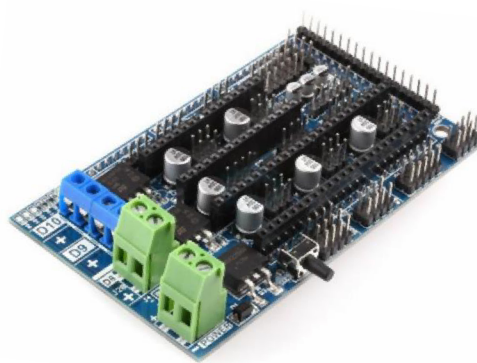
Obr. 37 Uchycení těsnění tiskového prostoru [vlastní]

### 3. 6. Ovládání mechanismu

Jako programovatelnou řídicí jednotku pro ovládání krokových motorů byla zvolena deska Arduino MEGA 2560 (Obr. 38) v kombinaci s CNC Shieldem RAMPS 1.6 (Obr. 39). Toto provedení je běžně dostupné pro hobby tiskáren a jednoduchých projektů, lze tedy využít mnoha online návodů a knihoven pro ovládání motorů.



Obr. 38 Arduino MEGA 2560 [23]



Obr. 39 Shield RAMPS 1.6 [24]

Prvotním záměrem pro ovládání krokových motorů bylo použití již vyvinutých, veřejně dostupných řešení. Těmi nejznámějšími jsou online konfiguratory Repetier a Marlin. Pro tento projekt byl vybrán Repetier díky možnosti konfigurace parametrů tiskárny v online prohlížeči. Zde stačí vyplnit požadované parametry tiskárny, jako například vlastnosti krokových motorů, rychlosti posuvů či charakteristiku dorazů jednotlivých os. Po správném doplnění parametrů

Ize přímo z online konfiguratoru stáhnout program připravený pro nahrání do řídicí jednotky, například do zvoleného Arduino Mega.

Samotný program nezajišťoval ovládání motorů, pouze jejich správnou komunikaci s řídicí jednotkou. Pro posuv motorů byl využit software Repetier Host, kde je možné také programovat cykly tiskárny pomocí G funkcí, podobně jako u CNC obráběcích strojů.

Tento způsob ovládání však neumožňoval vytvořit cyklus zahrnující měřenou přítlačnou sílu váhovými senzory. Z toho důvodu byl vytvořen vlastní Arduino Firmware, který kromě ovládání krokových motorů obsahoval také cyklus, při kterém je práškový materiál dávkován a přechován o přítlačnou desku, dokud nedosáhne zadaného tlaku i tloušťky vrstvy (Obr. 40).

```

while (tlak <= pozadovanyTlak) {
  Serial.println("tlak nedosažen");

  if ((currentPosition[1] + KrokM2) < 0) {
    Serial.println("V zásobníku není dostatek na další vrstvu.");
    loadZasobnik();
  }

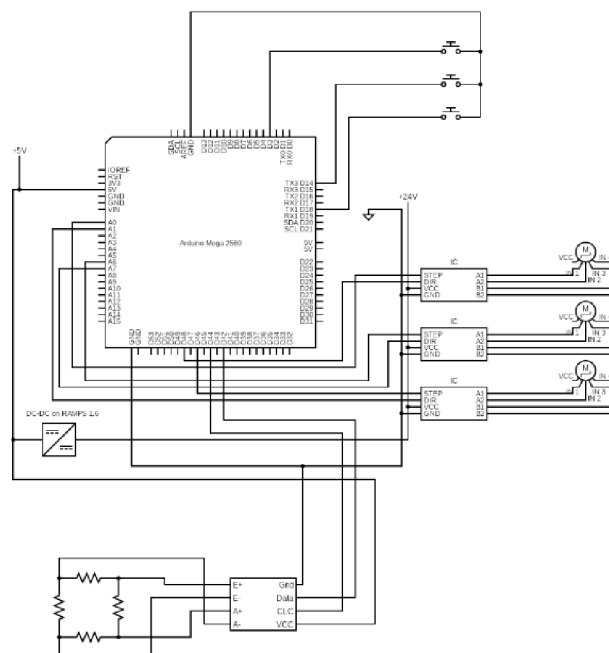
  moveAbsolute(2, KrokM3p0); // uhnout s deskou(m3) doprava
  moveRelative(0, vyskaHutneni / 2); // sjet tiskovou plochou(m1) o krok dolů
  moveRelative(1, KrokM2 / 2); // vyjet se zásobníkem(m2) o krok nahoru
  moveAbsolute(2, KrokM3p3); // deskou dojet až do leva
  moveRelative(0, -(vyskaHutneni) / 2); // vyjet tiskovou plochou(m1) o krok nahoru

  delay(30);
  tlak = loadcell.get_units(10), // načtení tlaku z loadcellu

  Serial.print("tlak = ");
  Serial.print(tlak);
  Serial.println(" g");
}
Serial.println("tlak dosažen");

```

Obr. 40 Část programu – přechovací cyklus [vlastní]



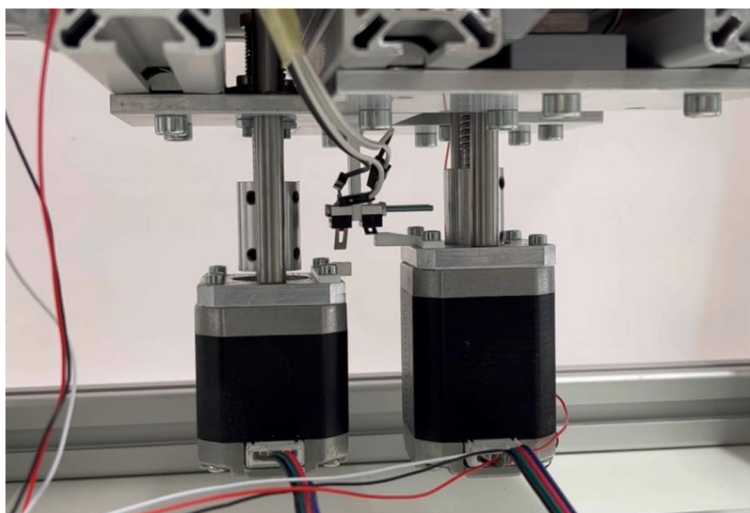
Obr. 41 Schéma zapojení [vlastní]

## 4. Technickoekonomické zhodnocení

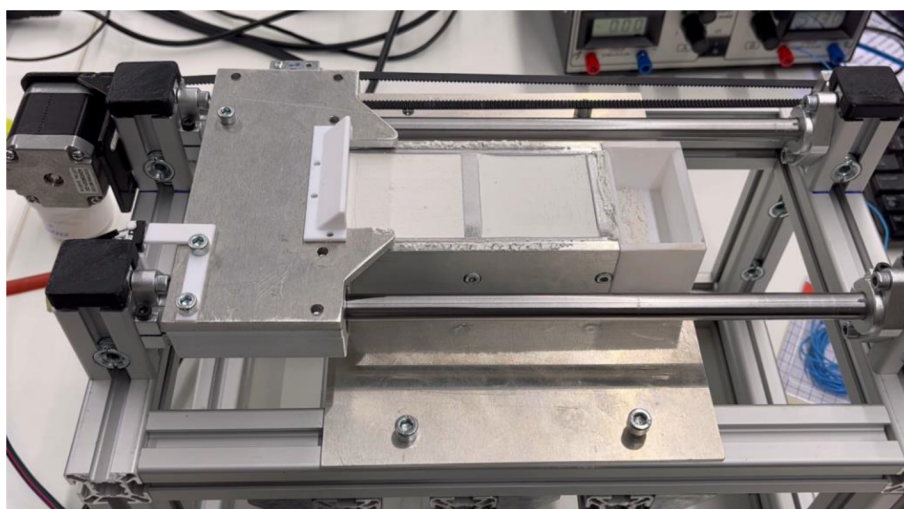
### 4. 1. Technické zhodnocení

Podle provedeného konstrukčního návrhu byla zhotovena třetí osa zařízení, zajišťující vertikální pohyb pro 3D tisk prášků na bázi  $\text{SiO}_2$  metodou SLM. Celé zařízení v kombinaci s dávkovacím mechanismem má za cíl rozvinout 3D tisk i do oblasti sklářského průmyslu a nabídnout tak možnost využití inovativní technologie s možností vytvářet mikroskopické, přesné 3D struktury.

Nyní je zařízení kompletně sestaveno, oživeno a testováno po stránce firmwarové funkčnosti. V současné době jsou na celém zařízení realizovány počáteční experimenty týkající se především optimálního nastavení tloušťky vrstvy a rychlosti posuvů motorů i laserového plotru (Obr. 42, 43).



Obr. 42 Fyzické provedení uchycení a zapojení krok. motorů [vlastní]



Obr. 43 Zhotovené zařízení během experimentů s mikromletým skelným pískem [vlastní]

## 4. 2. Ekonomické zhodnocení

Cílem této práce bylo zhotovit část experimentálního zařízení, na kterém budou prováděny testy s křemičitými materiály v oblasti 3D tisku skla metodou SLM. Toto pracoviště je navrženo tak, aby bylo jednoduše modifikovatelné v případě nutnosti změny požadavků na parametry zařízení pro experimenty.

Níže jsou uvedeny předpokládané ceny jednotlivých dílů nutných pro realizaci navrženého zařízení. Uvedená cena některých částí se může lišit. Na konci seznamu jsou zahrnuty i finanční náklady spojené s realizací dávkovacího mechanismu bakalářské práce kolegy F. Švejcara [18]. Závěrem je uvedena celková částka pro realizaci celého experimentálního zařízení.

<b>Položka</b>	<b>Cena [Kč]</b>
Extrudované hliníkové profily .....	7800,-
Spojovací prvky hl. profilů.....	2200,-
Krokový motor NEMA17 47mm .....	307,-
Krokový motor NEMA17 59mm .....	429,-
Trapézové šrouby .....	360,-
Trapézové matice .....	158,-
Vodící tyče .....	220,-
Kluzná pouzdra .....	55,-
Pryžové těsnění .....	60,-
Spojovací materiál .....	115,-
Duralové spojovací desky .....	370,-
Hřídelové spojky .....	132,-
Arduino MEGA 2560.....	499,-
Shield RAMPS 1.6 + drivery pro krokové motory .....	620,-
Váhový senzor 50kg HX711 .....	68,-
AD převodník Modul pro HX711 .....	49,-
Průmyslový zdroj 12V .....	400,-
Kabely .....	160,-
Koncové spínače .....	24,-
Díly pro dávkovací mechanismus .....	3260,-
<b>Cena celkem</b>	<b>17286,-</b>

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit konstrukční návrh třetí osy zařízení pro tisk skla metodou SLM. Prvním krokem byla podrobná rešerše dostupných možností provedení jednotlivých částí. Na základě zvolené vhodné varianty byl následně vytvořen koncept a poté samotné konstrukční řešení, a to formou 3D modelu a výrobní výkresové dokumentace.

I přes rozšíření metody SLM, primárně zaměřené na kovové materiály, bylo obtížné dohledat informace o možnostech konstrukčního provedení svislého posuvu tiskové plochy. Tyto informace byly získány vlastním pozorováním komerčních 3D tiskáren v laboratoři aditivních technologií v budově CxI na TUL. Použité řešení bylo zvoleno na základě maximálních rozměrů určených použitým laserovým plotrem, a především s ohledem na požadavky experimentů a použitého práškového materiálu.

Z dostupných řešení bylo zvoleno, jako nejvhodnější provedení, uchycení krokových motorů pevně k pohybujícím se stolkům, a to z důvodu nežádoucího axiálního zatížení motoru u varianty uchycení k rámu. Do uchycení pohonu tiskové plochy byly také zakomponovány váhové senzory pro měření přítláčné síly působící na tiskový materiál.

Vzhledem k dostupnému vnitřnímu prostoru laserového plotru, byla zvolena velikost tiskové plochy 52x52 mm. Práškové komory jsou od spodní části zařízení utěsněny pryžovou stěrkou. Její vhodnost a parametry budou ověřeny během experimentů se zkoumanými práškovými materiály na bázi  $\text{SiO}_2$ .

## Literatura

- [1] *What is 3D Printing?*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [2] *3D Printing Materials Guide: Plastics*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/>
- [3] *3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [4] *Metal 3D Printing: An Overview of the Most Common Types*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/metal/types-of-metal-3d-printing/>
- [5] *Intro to Ceramic 3D Printing*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/3d-printing-use-cases/intro-to-ceramic-3d-printing/>
- [6] BRUDER A., et al. *Development of a 3D-Printer for HT-SLS of Fused Silica Powder*, Joint Meeting of DGG, ČSS & SSS, Proceeding of 92nd Annual Meeting of the German Society of Glass Technology in
- [7] Conjunction with the Annual Meetings of the Czech Glass Society & the Slovak Glass Society, 28 – 30 May 2018, Bayreut. 2018; 110.
- [8] *G3DP Project: Mediated Matter & MIT Glass Lab Develop Advanced Glass 3D Printer*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://3dprint.com/90748/g3dp-glass-3d-print/>
- [9] NGUYEN, Du; MAYERS, Cameron; YEE, Timothy; DUDUKOVIC, Nicola, DESTINO, Joel; ZHU, Cheng et al. 3D-Printed Transparent Glass. Online. *Advanced Materials*, 2019-07-12. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201701181>.
- [10] HEN Z., Z. LI, J. LI, Ch. LIU, Ch. LAO, Y. FU, Ch.LIU, Y. LI, P. WANG a Y. HE. *3D printing of ceramics: A review*. *Journal of the European Ceramic Society*. 2019;39(4), s. 661–687.
- [11] *Schematic representation of Stereolithography*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>
- [12] Selective Laser Sintering. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/selective-laser-sintering>
- [13] KUBÍKOVÁ, Kristýna. *Využití technologie 3D tisku k výrobě metalurgického nářadí*. Online. 2019-02-03T09:14:27Z [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/150923>. Bakalářská práce.

- [14] *Schematic diagram of SLM 3D printing technology*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-SLM-3D-printing-technology-Adapted-from-Ref-22-with-permission-of\\_fig2\\_330118219](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-SLM-3D-printing-technology-Adapted-from-Ref-22-with-permission-of_fig2_330118219)
- [15] ANWAR Ahmad. *Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study*. Online. *Powder Technology*, 2019-06-15. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003259101930292X>
- [16] MERCELIS, Peter; KRUTH, Jean-Pierre. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 2006.
- [17] *Laserový plotr CO2 40W*. Online. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.cncworld.cz/laserov-plotr-co2-40w-max-40x40cm-air-assist-red-point-p-127.html>
- [18] ŠVEJCAR, Filip. *Systém dávkovače práškového materiálu pro 3D tisk skla technologií SLM*. Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2022. Místo: Univerzitní knihovna Technické univerzity v Liberci.
- [19] Alusic. *BH Line Aluminium profiles and accessories*. Mondovi: Alusic, 4/2023. Dostupné také z: <https://online.flippingbook.com/view/667286/9/>
- [20] *Krokový motor NEMA17 - 47 mm*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/48394-krokovy-motor-nema17-47mm-42hd6021-03.html>
- [21] *Koncový spínač pákový 2A 125VAC*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/koncovy-spinac-pakovy-2a-125vac/?gclid=CjwKCAjwjYKjBhB5EiwAiFdSfnahXh1JcSBDw9uBP3fgkfrSoZoNb83qXV7xmKW36yyehhPM-mqGWB0CUMAQAvD\\_BwE](https://www.laskakit.cz/koncovy-spinac-pakovy-2a-125vac/?gclid=CjwKCAjwjYKjBhB5EiwAiFdSfnahXh1JcSBDw9uBP3fgkfrSoZoNb83qXV7xmKW36yyehhPM-mqGWB0CUMAQAvD_BwE)
- [22] *Váhový senzor - 50 kg*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/2202-vahovy-senzor-50-kg.html>
- [23] *Klon Arduino MEGA precise*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://dratek.cz/arduino/946-eses-klon-arduino-mega-precise.html?gclid=Cj0KCCQjw98ujBhCgARIsAD7QeAjTaUJ7k8VcLNGXAhj1XLfjl26v6p5BVxryF2OAJL7xrO7zOI59QdQaAggXEALw\\_wcB](https://dratek.cz/arduino/946-eses-klon-arduino-mega-precise.html?gclid=Cj0KCCQjw98ujBhCgARIsAD7QeAjTaUJ7k8VcLNGXAhj1XLfjl26v6p5BVxryF2OAJL7xrO7zOI59QdQaAggXEALw_wcB)
- [24] *Reprap 1.6 pro 3D Tiskárny, CNC*. Online. [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/reprap-1-6-pro-3d-tiskarny--cnc/?gclid=Cj0KCCQjw98ujBhCgARIsAD7QeAhWRp2M5nDc8wjWD-jmiRud3Z3eKCbv2QYzGtBzKIFzZeJrAxTjx3QaAn\\_vEALw\\_wcB](https://www.laskakit.cz/reprap-1-6-pro-3d-tiskarny--cnc/?gclid=Cj0KCCQjw98ujBhCgARIsAD7QeAhWRp2M5nDc8wjWD-jmiRud3Z3eKCbv2QYzGtBzKIFzZeJrAxTjx3QaAn_vEALw_wcB)



## Seznam obrázků

Obr. 1 Nejprodávanejší FFF 3D tiskárna Prusa MK3S+ [3].....	11
Obr. 2 Filament se skelnými částicemi [vlastní] .....	12
Obr. 3 Schéma tiskárny SLA – [11] .....	13
Obr. 4 Schéma tiskárny G3DP [8] .....	13
Obr. 5 Schéma SLM tiskárny [14] .....	14
Obr. 6 Procesní parametry tisku [13] .....	15
Obr. 7 Zbytkové napětí vzniklé při chladnutí [16].....	16
Obr. 8 Motor uchycený k rámu tiskárny [vlastní] .....	17
Obr. 9 Motor uchycený k tiskové ploše [vlastní] .....	18
Obr. 10 Pohon umístěný vedle stolku [vlastní] .....	19
Obr. 11 Dávkování materiálu pomocí druhého stolku [vlastní].....	20
Obr. 12 Dávkování materiálu pomocí dvou zásobníků [vlastní] .....	20
Obr. 13 Dávkování materiálu násypkou [vlastní] .....	21
Obr. 14 Pěchování prášku válečkem [vlastní].....	21
Obr. 15 Pěchování pomocí krokového motoru [vlastní] .....	22
Obr. 16 Laserový plotr [17].....	23
Obr. 17 Zásobní prášku paralelně s tiskovou komorou [vlastní] .....	24
Obr. 19 PA váleček po roztírání bílých sazí [18].....	24
Obr. 18 Bílé saze po rozetření plastovou deskou [18] .....	24
Obr. 20 Schéma zvoleného provedení [vlastní] .....	25
Obr. 21 Rozdělení konstrukčních částí [vlastní] .....	26
Obr. 22 Rám zařízení v laserovém plotru [vlastní] .....	27
Obr. 23 Al profil se závitovými spojkami [19] .....	27
Obr. 24 Rám tiskového zařízení [vlastní].....	27
Obr. 25 Tisková komora a zásobník prášku [vlastní].....	28

Obr. 26 Umístění tiskové plochy a zásobníku v rámu [vlastní] .....	28
Obr. 27 Krokový motor NEMA 17, 47 mm [20] .....	29
Obr. 28 Spojení hřídele motoru s trapézovým šroubem [vlastní] .....	29
Obr. 29 Uchycení kluzných pouzder a matice [vlastní] .....	30
Obr. 30 Sestava posuvu zásobníku prášku [vlastní] .....	30
Obr. 31 Koncový spínač pákový [21] .....	31
Obr. 32 Uchycení koncových spínačů [vlastní] .....	31
Obr. 33 Váhový senzor HX711 [22] .....	32
Obr. 34 Domeček váhového senzoru [vlastní] .....	32
Obr. 35 Sestava s umístěním váhových senzorů [vlastní] .....	33
Obr. 36 Pryžové těsnění práškových komor [vlastní] .....	33
Obr. 37 Uchycení těsnění tiskového prostoru [vlastní] .....	34
Obr. 38 Arduino MEGA 2560 [23] .....	34
Obr. 39 Shield RAMPS 1.6 [24] .....	34
Obr. 40 Část programu – pýchovací cyklus [vlastní] .....	35
Obr. 41 Schéma zapojení [vlastní] .....	35
Obr. 42 Fyzické provedení uchycení a zapojení krok. motorů [vlastní] .....	36
Obr. 43 Zhotovené zařízení během experimentů s mikromletým skelným pískem [vlastní]...	36

## Seznam výkresové dokumentace

Zařízení pro svislý posuv prášku	2-BP-S19000037-00-00
Rám tiskového zařízení	2-BP-S19000037-01-00
Pohon tiskové plochy	2-BP-S19000037-02-00
Spojovací deska tisk. plochy	4-BP-S19000037-02-01
Deska uchycení motoru	4-BP-S19000037-02-02
Deska pro váhový senzor	4-BP-S19000037-02-03
Pohon zásobníku prášku	2-BP-S19000037-03-00
Spojovací deska zásobníku	4-BP-S19000037-03-01
Kusovník zařízení třetí osy	4-BP-S19000037-00-00-K
Kusovník rámu tiskového zařízení	4-BP-S19000037-01-00-K
Kusovník pohonu tisk. plochy	4-BP-S19000037-02-00-K
Kusovník pohonu zásobníku	4-BP-S19000037-03-00-K