



**FAKULTA  
ŠTOJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav konstruování a částí strojů**

**Konceptní návrh stavebnicové 3D tiskárny**

**Conceptual Design of a Modular 3D Printer**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2021**

**Miroslav KOTRČ**

**Studijní program:** B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŠTOJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Mrázek, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kotrč** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **483251**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Koncepční návrh stavebnicové 3D tiskárny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Conceptual Design of a Modular 3D Printer**

Pokyny pro vypracování:

Provedte koncepční návrh stavebnicového řešení 3D tiskárny. Konstrukci řešte parametricky. Navrhněte řešení pomocí stavebnicové hliníkové konstrukce. Použijte co nejvíce standardizovaných dílů v konstrukci. Rozměr pracovního prostoru řešte parametricky (x,y,z, 200x200x200 - 1000x1000x1000). Stručná osnova zadání:

1. Zpracujte rešerši problematiky konstrukce 3D tiskáren. Zaměřte se na dostupné prvky konstrukce, které lze koupit hotové, standardizované.
2. Provedte koncepční návrh několika variant řešení.
3. Vyberte vhodnou variantu a tu dále rozpracujte
4. Zpracujte nezbytné návrhové a kontrolní výpočty.
5. Zpracujte parametricky koncepční 3D model řešení.
6. Vytvořte 2D koncepční výkres řešení s vybranými detaily.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Stránky projektu REPRAP. Dostupné z: <http://reprap.org/>
- 2) CHUA, Chee Kai. a Kah Fai. LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte., 2014. ISBN 9789814571401.
- 3) PRŮŠA, Josef. 3D tisk [online]. Dostupné z: <http://josefprusa.cz/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jiří Mrázek, Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2021**

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

\_\_\_\_\_  
Ing. Jiří Mrázek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Ing. František Lopot, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Koncepční návrh stavebnicové 3D tiskárny“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Mrázka Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 4. 5. 2021

Miroslav Kotrč

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Jiřímu Mrázkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval v průběhu tvorby mé bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat rodičům za jejich podporu v průběhu mého studia na vysoké škole.

## ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Miroslav Kotrč
Název BP:	Koncepční návrh stavebnicové 3D tiskárny
Anglický název:	Conceptual Design of a Modular 3D Printer
Rok:	2021
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Jiří Mrázek, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jiří Mrázek, Ph.D.
Bibliografické údaje	počet stran 71 počet obrázků 54 počet tabulek 22 počet příloh 2
Klíčová slova:	3D tisk, FDM tisk, koncept, modulární
Keywords:	3D printing, FDM printing, concept, modular
Abstract:	Bachelor thesis deals with design of the modular 3D printer with printing area in range from 200 x 200 mm to 1000 x 1000 mm and with the height of printing space from 200 mm to 1000 mm. Part of the thesis is also search about the 3D printing. The goal is to create conceptual solution in 3D CAD and 2D drawing of the assembly.
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá koncepčním návrhem stavebnicové 3D tiskárny s tiskovou plochou od 200 x 200 mm do 1000 x 1000 mm a výškou tiskového prostoru od 200 mm do 1000 mm. Součástí práce je také rešerše zabývající se 3D tiskem. Cílem práce je vytvoření koncepčního řešení včetně 3D modelu a výkresu sestavy.

## OBSAH

1. Úvod .....	1
1.1. Historie 3D tisku .....	2
2. Rešerše .....	3
2.1. Typy 3D tiskáren .....	3
2.1.1. SLA (Stereolithography) .....	3
2.1.2. SLS (Selective Laser Sintering) .....	4
2.1.3. DMLS (Direct Metal Laser Sintering).....	4
2.1.4. FDM (Fused Deposition Modeling).....	5
2.1.5. MJP (Multijetprinting).....	5
2.1.6. BJ (Binder Jetting) .....	6
2.1.7. LOM (Laminated Object Manufacturing).....	7
2.1.8. SHS (Selective Heat Sintering) .....	7
2.1.9. DLP (Digital Light Processing) .....	8
2.2. Části FDM tiskárny .....	8
2.2.1. Rám.....	9
2.2.2. Tisková deska .....	9
2.2.3. Extruder .....	10
2.2.4. HotEnd .....	10
2.2.5. Krokové motory a další elektronika .....	11
2.3. Konstrukční provedení tiskáren .....	12
2.3.1. Kartézské.....	12
2.3.2. Delta .....	12
2.3.3. Polar.....	13
2.3.4. Scara .....	13
2.3.5. Pásové 3D tiskárny .....	14
3. Dostupné díly.....	15
3.1. Extrudery .....	15
3.1.1. Přímé extrudery .....	15
3.1.1.1. Titan Aero Extruder.....	15
3.1.1.2. E3D Hemera .....	16
3.1.2. MK8 přímý Extruder .....	16
3.1.3. Bovdenové extrudery.....	16
3.1.3.1. BMG extruder .....	16
3.1.3.2. Bulldog extruder .....	17
3.1.3.3. MK8 extruder .....	17
3.2. Hotendy .....	18
3.3. Tiskové podložky.....	18
3.3.1. Deska vyhřívána pomocí tištěného spoje (PCB) .....	18
3.3.2. Polyimidové vyhřevné fólie.....	18
3.3.3. Silikonové vyhřevné fólie .....	19
3.4. Krokové motory .....	19
3.5. Rámy a pojezdy .....	20

3.5.1.	Řešení Bosch Rexroth.....	20
3.5.2.	Řešení Item Haberkorn .....	21
3.5.3.	Řešení Alutec KK .....	21
3.5.4.	Řešení OpenBuilds .....	22
4.	Koncepce tiskárny.....	23
4.1.	Rozložení posuvových os.....	23
4.2.	Návrh koncepce rámu .....	23
4.3.	Rozložení pohonů a konstrukce pojezdů .....	23
4.3.1.	Portálové řešení pro XY .....	23
4.3.2.	Křížové uspořádání pro XY .....	24
4.3.3.	Pojezd tiskové podložky .....	25
4.3.4.	Pohon portálu .....	25
4.3.5.	Pohon tiskové podložky .....	26
5.	Návrhové výpočty .....	29
5.1.	Návrh osy Z .....	29
5.1.1.	Návrh rámu tiskové desky .....	29
5.1.2.	Návrh pohybových šroubů .....	30
5.1.3.	Matice .....	32
5.1.4.	Řemenový převod pro osu Z.....	33
5.1.5.	Volba krokových motorů pro osu Z .....	34
5.1.6.	Volba axiálních ložisek .....	38
5.1.7.	Napínání řemenu a volba ložisek .....	39
5.1.8.	Lineární vedení.....	40
5.2.	Návrh XY .....	42
5.2.1.	Předpokládané rychlosti .....	43
5.2.2.	Návrh řemenového převodu .....	43
5.2.3.	Volba krokových motorů.....	44
6.	Konstrukce.....	48
6.1.	Rám.....	48
6.2.	Rozvržení tiskárny .....	49
6.3.	Vozík tiskové podložky.....	52
7.	Závěr.....	54
	Použitá literatura .....	57
	Seznam Obrázků.....	61
	Seznam Tabulek .....	62
	Seznam Příloh.....	62

## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$m_{ij}$	[kg]	Hmotnost tištěného dílu
X	[mm]	Délka tiskové desky v ose X
Y	[mm]	Délka tiskové desky v ose Y
Z	[mm]	Výška tiskového prostoru
$m_{vi}$	[kg]	Hmotnost vozíku
q	[kg/mm]	Spojité zatížení
$L_p$	[mm]	Délka profilu
$\sigma_o$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Ohybové napětí
$\sigma_D$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Dovolené napětí
W	[cm <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v ohybu
E	[N/mm <sup>2</sup> ]	Modul pružnosti v ohybu
I	[cm <sup>4</sup> ]	Moment setrvačnosti
F <sub>o</sub>	[N]	Ohybová síla
$d_2'$	[mm]	Návrhový střední průměr závitu
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Tíhové zrychlení
$\psi_H$	[-]	Součinitel dle druhu závitu
$\psi_h$	[-]	Pracovní součinitel
$p_d$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Dovolený tlak v závitech
$\gamma$	[°]	Úhel stoupání závitu
$\beta$	[°]	Úhel boku závitu
$\beta'$	[°]	Úhel profilu závitu ve směru hlavní normály
f	[-]	Součinitel tření
$\varphi'$	[°]	Úhel tření
i	[-]	Počet chodů závitu
P	[mm]	Stoupání závitu
$d_2$	[mm]	Střední průměr závitu
$M_{kš}$	[Nmm]	Točivý moment v pohybovém šroubu
k	[N/mm]	Tuhost řemene
$F_{ři}$	[N]	Síla v řemenu
$k_{ri}$	[N/mm]	Skutečná tuhost řemene
$\Delta L_i$	[mm]	Protažení řemene
$\alpha_i$	[°]	Pootočení pohybového šroubu
$\Delta Z_i$	[mm]	Posuv tiskové podložky v ose Z od vzájemného potočení pohybových šroubů
$F_{A/Bi}$	[N]	Síla působící v pohybových šroubech
L	[Hod]	Trvanlivost ložisek
$F_{25\%}$	[kN]	Čtvrtina síly působící v pohybovém šroubu
$d_3$	[mm]	Malý průměr závitu
C	[kN]	Dynamická únosnost ložiska
$C_0$	[kN]	Statická únosnost ložiska
$F_{max}$	[kN]	Maximální síla působící na ložisko
$F_{Nap}$	[N]	Napínací síla v řemenu
$F_{Ldyn}$	[N]	Síla na ložiska
d	[mm]	Malý průměr ložiska
D	[mm]	Velký průměr kladky
$F_c$	[N]	Zatížení od tištěného dílu vyplňujícího 50 % největšího tiskového prostoru dané tiskové desky
F	[N]	Zatížení od excentricky umístěného tištěného dílu
A	[mm]	Velikost podložky



e	[mm]	Excentricita vůči vedení
$M_k$	[Nmm]	Moment od vyosené síly
$F_u$	[N]	Síla na kladku
$F_{lc}$	[N]	Síla na kladku se započteným předpětím
$L_h$	[Hod]	Trvanlivost ložiska v kladce
$m_h$	[kg]	Hmotnost tiskové hlavy
a	[mm]	Osová vzdálenost řemenic
L	[mm]	Délka řemene
$F_v$	[N/Tr.]	Napínací síla na větev řemene
$F_{vc}$	[N]	Celková napínací síla
$F_{anf}$	[N]	Síla při rozběhu
$F_{brems}$	[N]	Síla při brždění
$\Delta L_{\check{r}}$	[mm/m/N]	Prodloužení řemene
$m_p$	[kg]	Hmotnost portálu
$M_{k\check{r}h}$	[Nmm]	Moment pro pohon tiskové hlavy
$M_{k\check{r}p}$	[Nmm]	Moment pro pohon portálu

## 1. Úvod

3D tisk je aditivní technologie umožňující výrobu tvarově složitých dílů. Původně byl 3D tisk určen především k výrobě prototypů během vývoje nových dílů, tzv. rapid prototyping. Výroba prototypů pomocí 3D tisku je vhodná zejména ke snižování nákladů. 3D tištěné prototypy lze využít zejména pro montážní testy. Výroba těchto prototypů je levnější a časově méně náročná než při využití konvenčních metod výroby. [1]

S dalším vývojem se začíná uplatňovat také v sériové výrobě. Pro sériově vyráběné díly jsou koncipovány průmyslové tiskárny využívající práškovou technologii tisku. Mezi tyto tiskárny patří HP Jet Fusion 4200, jedná se o MJF tiskárnu, pomocí které se tisknou respirátory RP95-3D. V případě tiskáren tisknoucích z pevného materiálu se pro sériovou výrobu využívají tzv. tiskové farmy. Díly se tisknou na několika tiskárnách zároveň v kontrolovaném prostředí, v závislosti na velikosti dílů se tisknou po jedné nebo po více částech.

Díly vyráběné 3D tiskem mají široké využití napříč obory. Od využití v lékařství po letecký průmysl, či aplikace pro vesmírné lety. V lékařství lze 3D tisk využít k výrobě kloubních náhrad upravených podle potřeb pacienta. Obdobně mohou být zhotovovány také zubní náhrady. V průmyslovém využití má 3D tisk význam zejména pro tvarově složitě díly. Lze také optimalizovat rozložení materiálu pro snížení hmotnosti dílů, zefektivnit chlazení forem etc. Existují také stavební aplikace, lze vytisknout celý dům. V neposlední řadě 3D tisk využívají také umělci, pro tisk soch a dalších předmětů. [2]

Práce se zaměřuje na koncept stavebnicové 3D tiskárny složené zejména z dílců dostupných na trhu. Tiskárna bude tisknout materiál ve formě tiskové struny. Je to jedna z mnoha technologií 3D tisku. Jednotlivé technologie budou v rámci práce dále popsány.

V rámci práce bude tedy řešena koncepce FDM tiskárny. Základními částmi tohoto typu tiskárny jsou tisková hlava a základna. Tisková základna a tisková hlava se vůči sobě pohybují, tak aby bylo možno tisknout po celé základně.

## 1.1. Historie 3D tisku

3D tisk byl původně označován jako Rapid Prototyping, jak již bylo zmíněno v úvodu výroba prototypů pomocí 3D tisku výrazně snižuje náklady na vývoj nových komponent. Využití této technologie je výhodné zejména pro plastové díly, které jsou obvykle vyráběny pomocí vstřikovacích lisů. Výroba jednotlivých prototypů touto metodou by znamenala velmi vysokou finanční i časovou zátěž pro celý vývoj. [2]

Koncept 3D tisku má své kořeny v 50. letech 20. století, tehdy byl prvně popsán autorem sci-fi Raymondem F. Jonesem v říjnu roku 1950. V tomto článku s názvem Tools of the Trade popsal 3D tisk jako molekulární sprej. [3]

Vynález stereolitografie znamenal první krok ve vývoji 3D tisku tak jak jej známe dnes. Stereolitografii si patentoval Chuck Hull v roce 1984, první díl vytiskl touto technologií o rok dříve. V roce 1986 spoluzaložil společnost 3D Systems. Stereolitografie je také známa pod zkratkou SLA, první tiskárna tisknoucí touto technologií byla představena v roce 1987 firmou 3D Systems. V roce 1992 byla uvedena nová tiskárna, která již byla prodávána široké veřejnosti. Ve stejném roce přišla firma DTM Inc. s první SLS tiskárnou. [4]

V dalším období se rozvíjely medicínské aplikace 3D tisku, byl vytištěn první rastr pro orgány. Tyto rastry jsou následně pokryty povlakem buněk pacienta, takto vzniklou tkáň je možné implantovat pacientovi. V období mezi roky 1999 až 2010 byla vytištěna také miniaturní funkční ledvina, komplexní protetická noha a bio-vytištěné krevní cévy. [4]

Průlom ve vývoji tiskáren byl počátek open source tiskáren, tedy volně dostupný a modifikovatelný design tiskáren, který je postupem času vyvíjen nejen v rámci firem z oboru, ale také komunitou lidí se zájmem o 3D tisk, na tomto základu jsou založeny FDM tiskárny od Josefa Průši. [1] [4] [5]

Projekt RepRap je nedílnou součástí open source tiskáren. Projekt byl založen roku 2005 na University of Bath doktorem Adrianem Bowyerem. Cílem je navrhnout tiskárnu, která bude schopná vytisknout co nejvíce vlastních komponent. Celý projekt je open source a díky tomu nabyly RepRap tiskárny na velké popularitě. Staly se tak nejrozšířenějším druhem tiskáren na světě. [1] [4] [5]

## 2. Rešerše

Rešerše se zaměřuje na popis FDM 3D tiskárny a dalších technologií 3D tisku. Dále popisuje hlavní části a konstrukční provedení FDM tiskáren. Dalším krokem je průzkum trhu na dostupné díly pro tyto 3D tiskárny.

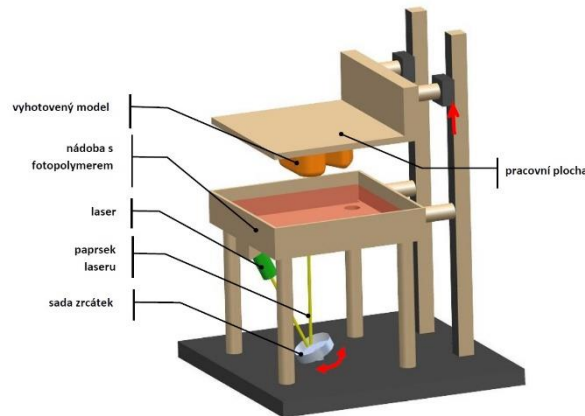
### 2.1. Typy 3D tiskáren

Existuje celá řada 3D tiskáren, lze je rozdělit podle několika hledisek. Prvním z nich bude koncepce, zda se jedná o open source tiskárnu či nikoliv. Různí výrobci k tomuto přistupují po svém. Někteří vyvíjí a vyrábí tiskárny, které jsou zcela volně upravitelné a jejich plány jsou volně dostupné. Takto jsou řešeny většinou hobby či poloprofesionální tiskárny. Tiskárny pro profesionální užití, které zaručují jistou přesnost a opakovatelnost tisku, bývají certifikované pro určitý materiál a servis je plně zajišťován dodavatelskou firmou. [1] [6]

Dalším kritériem je způsob tisku, existuje celá řada možností, tiskárny mohou tisknout z materiálu ve formě struny, prášku, či tekutiny pomocí různých metod. Tyto metody budou dále popsány.

#### 2.1.1. SLA (Stereolithography)

Nejstarší technologie 3D tisku byla vynalezena roku 1983. Je založena na vytvrzování kapalného polymeru, který reaguje na UV záření. Existují dva konstrukční typy. První typ má pracovní plochu, která je na počátku tisku ponořena ve fotopolymeru, ten je ozařován UV světlem zespodu a posouvá se vzhůru a vytahuje model z nádoby. Druhý typ osvětluje polymer zhora, zdroj UV světla je součástí posuvné desky. Deska po vrstvách potápí do nádoby s polymerem. Výhodou této metody je vysoká přesnost. K nevýhodám patří možnost využít pouze fotocitlivé materiály a vytištěné díly je potřeba dovytvdit UV světlem, aby se zlepšily jeho mechanické vlastnosti. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,01 mm. [7] [5] [8]



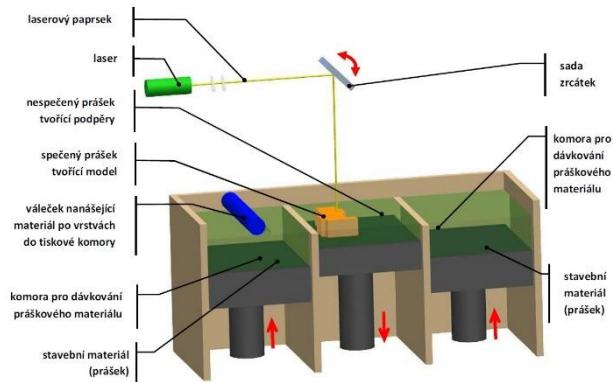
Obrázek 1 SLA [7]

### 2.1.2. SLS (Selective Laser Sintering)

Technologie využívá práškový materiál, který spéká pomocí tepla vyvinutého laserovým paprskem. Technologie byla patentována roku 1987, v roce 1992 zahájila firma DTM Inc. výrobu těchto tiskáren. Na tiskovou plochu je nanášena tenká vrstva materiálu, ten je nataven laserem do požadovaného tvaru a následně je nanášena další vrstva prášku. Vhodné materiály pro tuto metodu jsou keramiky a plasty (Nylon, ABS, PET, etc.) K výhodám patří nízká pořizovací cena materiálu a možnost znovu použít přebytečný prášek. Nevýhodou je vysoká cena tiskáren a nedokonalý povrch. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,06 mm. [7] [8]

### 2.1.3. DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

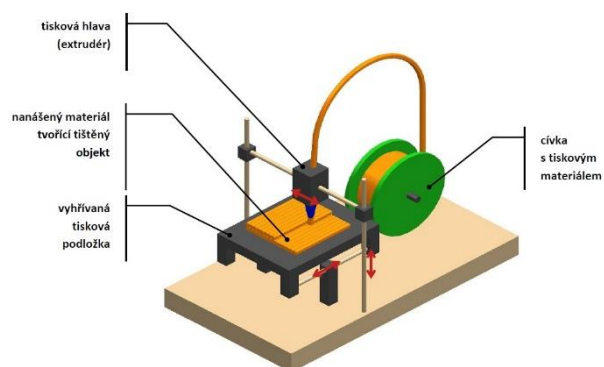
Tato technologie je založena na stejném principu jako SLS, práškový materiál je však kov. Laser má tak větší výkon, musí vyvinout více tepla k natavení prášku v požadovaném tvaru. Prášek je nanášen po vrstvách a postupně taven. Tisková komora je vyplněna ochrannou argonovou atmosférou. Výhodou je možnost výroby tvarově složitých dílů bez využití podpor, tisk má kvalitní povrch a vysokou přesnost. Nevýhodou jsou vysoké ceny tiskáren. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,02 mm. [7] [8]



Obrázek 2 SLS a DMLS [7]

#### 2.1.4. FDM (Fused Deposition Modeling)

Metoda tisku byla patentována roku 1989. V současnosti se jedná o nejrozšířenější metodu 3D tisku. Materiál ve formě struny je nahříván v tiskové hlavě a tryskou je postupně nanášen ve vrstvách na tiskovou plochu. Tisková plocha bývá vyhřívána, aby rovnoměrněji chladl a lépe držel na tiskové desce. Tiskárny mohou být jedno nebo více tryskové, tak lze tisknout podpurné konstrukce z jiného materiálu. Tento podpurný materiál lze odbourat vodou nebo jinými chemickými prostředky. Mezi tisknutelné materiály patří PLA, ABS, PETG, ASA, Nylon a další. Lze tisknout také materiály s příměsí bronzu, uhlíkové či skelného vlákna, nebo dřeva. Hlavní výhodou metody jsou dobré pevnostní vlastnosti. Nevýhodou je hrubá struktura a komplikace při odstraňování podpurného materiálu. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,1 mm. [7] [8]

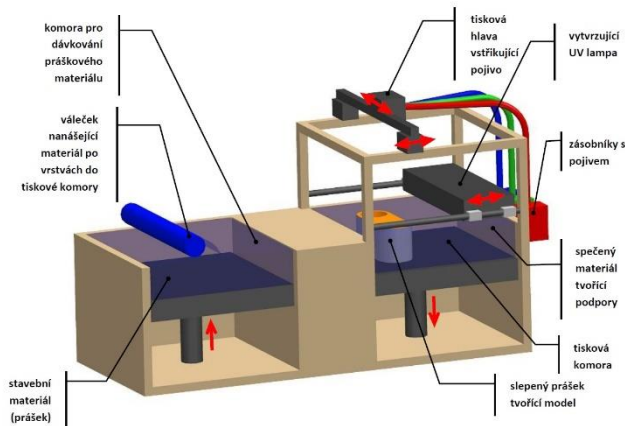


Obrázek 3 FDM [7]

#### 2.1.5. MJP (Multijetprinting)

MJP tiskárny jsou schopny tisknout dílce v různých barvách a z materiálů s různými vlastnostmi. Technologie byla patentována roku 1991 společností 3D Systems. Tiskárna

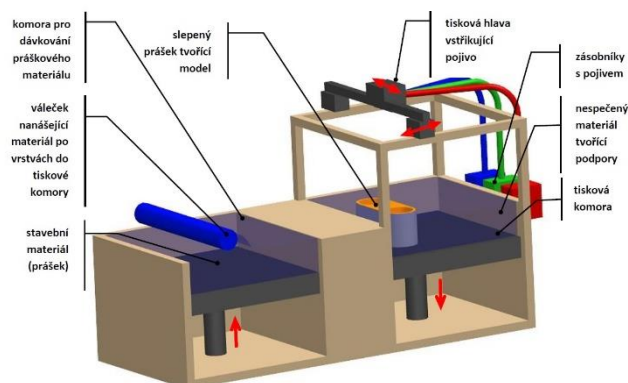
využívá práškový tiskový materiál, který je nanášen na stavební podložku. Na nanesenou vrstvu je nanесeno pojivo a prášek, ten je spolu s pojivem vytvrzen pomocí UV světla. Tento proces se opakuje, dokud není model dokončen. Po dokončení tisku jsou voskové podpory odstraněny pomocí vyhřívané pece. Materiály na tisk jsou vyrobeny od výrobce tiskárny 3D Systems. Výhodou je kvalitní povrch, přesnost rozměrů, dobré mechanické vlastnosti a rychlost tisku. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,016 mm. [8] [9]



Obrázek 4 MJP [7]

### 2.1.6. BJ (Binder Jetting)

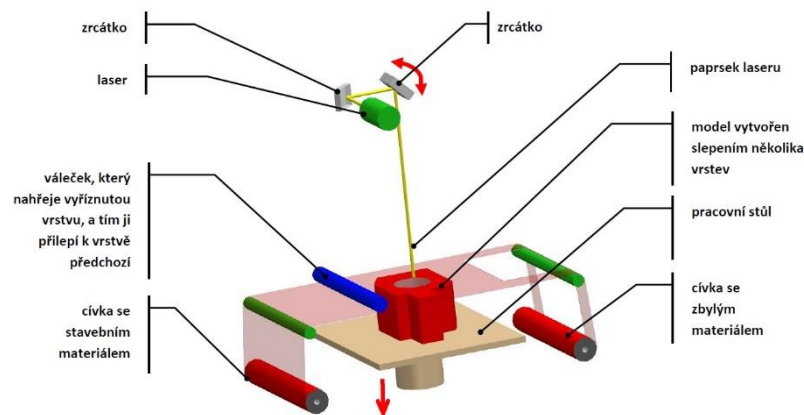
Technologie založena na chemickém vytvrzování materiálu pomocí pojiva. Tento druh tisku byl patentován společností 3D Systems roku 1993. Princip je podobný jako u MJP. Práškový tiskový materiál je spojován pomocí pojiva, které je nanáшено tiskovou hlavou. Tisknutelné materiály jsou hliník, nerezová ocel, nebo kompozitní materiály. K výhodám patří široký výběr materiálu, možnost výroby barevných komponent a rychlost tisku. K nevýhodám lze zařadit vysokou cenu tiskáren a nutnost úpravy povrchu pro zlepšení mechanických vlastností. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,09 mm. [7]



Obrázek 5 BJ [7]

### 2.1.7. LOM (Laminated Object Manufacturing)

Způsob 3D tisku pocházející z Izraele, patent byl předložen roku 1996. Tisk je založen na vyřezávání jednotlivých vrstev z plastu nebo papíru. Tyto vrstvy jsou slepovány a tvoří tištěnec. Materiál, ze kterého se vrstvy vyřezávají je odvíjen mezi cívkami. Tvar může být vyřezáván nožem nebo laserem. K výhodám patří nízká cena materiálu a vysoká kvalita povrchu. Nevýhodou je velké množství odpadu a nutnost mechanicky odstraňovat podpory. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,1 mm a záleží na výchozím materiálu. [7] [8]

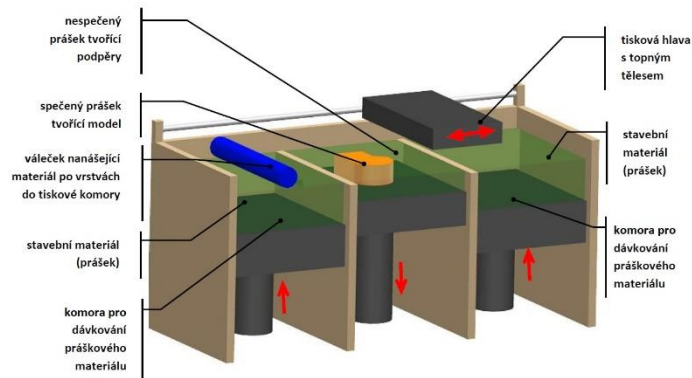


Obrázek 6 LOM [7]

### 2.1.8. SHS (Selective Heat Sintering)

Tato technologie byla patentována roku 2002 firmou BLUE PRINTER. Tiskárna funguje na podobném principu jako SLS typy. Tiskový materiál je ve formě prášku do tiskového prostoru nanášen po vrstvách. Prášek je vytvrzován pomocí topného tělesa v tiskové hlavě. Topné těleso taví prášek do požadovaného tvaru. Výhodou metody je možnost znovu použít nevyužitý prášek, není nutné tisknout podpory, možnost vyrábět tvarově složité díly a nízká pořizovací cena. Model je před vyjmutím z tiskárny nutno očistit od přebytečného materiálu. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,1 mm. [7] [8]

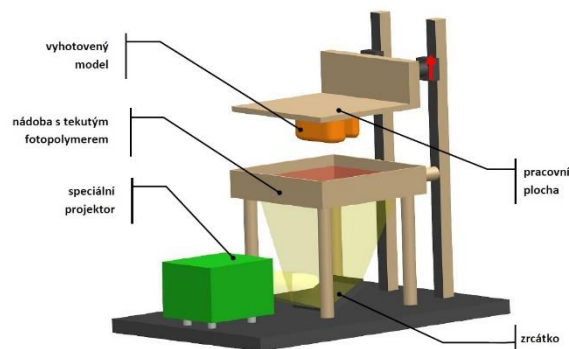




Obrázek 7 SHS [7]

### 2.1.9. DLP (Digital Light Processing)

Tento typ tisku byl patentován v roce 2012. Princip tisku je velmi podobný jako u SLA tiskáren. Tisk je tedy možný jak shora, tak zdola. Rozdílem je že DLP tiskárna využívá jako zdroj UV záření projektor, který osvítí celou pracovní plochu v jeden okamžik. Tiskový materiál je kapalný fotonopolymér. Výhodou je rychlost a přesnost tisku a nízká cena zařízení. Nevýhody jsou shodné jako u SLA technologie. Minimální velikost vrstvy je přibližně 0,01 mm. [7]



Obrázek 8 DLP [7]

## 2.2. Části FDM tiskárny

FDM tiskárny se skládají z těchto základních částí: z rámu, tiskové desky, extruderu, hotendu, pohonu posuvů a jejich vedení. Pro snížení výrobních nákladů a zjednodušení výroby je snaha používat co největší počet dílů dostupných na trhu. Jednotlivé součásti tiskárny je možné také vyrábět 3D tiskem zejména různé části rámu: držáky motorů, spojovací díly, kryty elektroniky. [6]

K dalším částem lze zařadit koncové spínače, které slouží ke kalibraci nulové polohy v souřadnicovém systému. Ke kalibraci slouží také dotykové sondy, které měří vzdálenost trysky od tiskové plochy a tím její rovnoběžnost. Díky tomuto měření tiskárna optimalizuje posuv v ose Z, aby vyrovnala případné odchylky v rovnoběžnosti desky a posuvového mechanismu. [6]

### **2.2.1. Rám**

Rám může být konstruován z různých materiálů, k nejpoužívanějším patří hliníkové profily, plastové díly, které jsou vyřezávány z tabulí plastu, a vodící tyče pro lineární ložiska. Velká část spotřebitelských tiskáren dostupných na trhu využívá otevřené nezakrytované konstrukce rámu složené z hliníkových profilů s V-drážkou. Otevřená konstrukce je nevýhodná pro tisk materiálů citlivých na změny teplot a rychlé chladnutí, například ABS. [1] [5]

Pro potřeby stavebnicové koncepce bude vhodné použít hliníkové profily. Mají velkou variabilitu a vyrábí se v délkách až 6 metrů. Profily s V-drážkou lze využít také jako vedení pro pojezdy. Pro pojezd ve V-drážce se využívají kola s polymerovým běhounem se zkosenými stranami. [10]

### **2.2.2. Tisková deska**

Tisková deska je důležitá pro dosažení kvalitního tisku. Záleží u ní na rovinnosti a musí být rovnoběžná s plochou XY. Na tiskovou desku se umísťují tiskové podložky s upraveným povrchem pro lepší přilnavost plastu a snazší odebrání modelů. Ke zlepšení adheze může být tisková deska také vyhřívána. [1] [6]

Některé tiskové materiály vyžadují vyhřívanou tiskovou desku pro úspěšný tisk. Topné těleso může být zabudováno v tiskové desce, nebo na ni být přilepeno ve formě fólie s topným tělesem. Součástí těchto prvků je snímač teploty umožňující její regulaci. [9]



*Obrázek 9 Vyhřívaná podložka [11]*

### **2.2.3. Extruder**

Extruder slouží k podávání tiskového materiálu (filamentu) do hotendu. Extruder lze umístit přímo do tiskové hlavy nebo jej umístit na rám a propojit s tiskovou hlavou bovdenem. [6]

Extruder je složen ze dvou částí krokového motoru a mechanismu k podávání filamentu. Filament je podáván pomocí ozubeného kola a kladky, která jej přitlačuje k tomuto kolu, nebo pomocí dvou ozubených kol, která jsou obě poháněna. [1] [5]



*Obrázek 10 Extruder [12]*

### **2.2.4. HotEnd**

Hotend je součástí tiskové hlavy. Filament podávaný extruderem je v hotendu taven a tryskou přiváděn do tiskového prostoru a po vrstvách tvoří model. Hotend je tedy topná část tiskárny. Součástí hotendu je ventilátor, který usnadňuje regulaci teploty, teplotní snímač a tryska. [6]

Hotendy se vyrábí v řadě variant, mohou být určeny pro jednu či více trysek. Hotendy s více tryskami usnadňují tisk více barevných modelů a použití podpor z jiného materiálu, než je materiál dílu. [6]

Vnitřní průměr trysky určuje, jak detailně lze součást vytisknout. Čím menší je průměr trysky, tím detailněji lze tisknout. Menší průměr znamená pomalejší tisk a tisk menší vrstvy materiálu. Větší tryska je vhodná pro tisk větší dílců, snižuje se tím tiskový čas. [5]



*Obrázek 11 HotEnd [13]*

### **2.2.5. Krokové motory a další elektronika**

Krokové motory zajišťují posuvy jednotlivých osách, pro osu Z je často používán rovnoramenný lichoběžníkový šroub, pro osy X a Y je obvyklý pohon pomocí ozubeného řemene. Krokový motor se rovněž využívá k pohonu extruderu. Krokové motory jsou ovládány pomocí řídicí jednotky, která jim zároveň dodává energii a komunikuje s hlavní deskou obsahující firmware tiskárny. [1]



*Obrázek 12 Krokový motor [14]*

K dalším částem tiskárny patří koncové snímače, jenž jsou určeny pro stanovení nulového bodu 3D tiskárny. Podobnou funkci zastupuje dotekové čidlo používané k měření

vzdálenosti tiskové podložky od tiskové hlavy. Toto čidlo může být také kapacitní, toto řešení je přesnější. K dalším čidlům patří teplotní čidla, ta kontrolují teplotu tiskové podložky, hotendu a dalších částí. [1]

Tiskárně dodává energii zdroj, který převádí síťové střídavé napětí 220 V na stejnosměrné napětí, zde se obvykle využívá napětí 12 V nebo 24 V. Příkon zdroje je určen výkonem jednotlivých součástí. Obvykle se pohybuje kolem 300 W. [1]

### **2.3. Konstrukční provedení tiskáren**

Existuje několik základních koncepcí 3D tiskáren. Jednotlivé typy se liší nejen konstrukcí, ale také používaným souřadnicovým systémem. Koncepce jsou v rámci rešerše dále popsány.

#### **2.3.1. Kartézské**

Pojezdy jsou řešeny lineárním pohybem po vedení ve směrech XYZ. Posuvy mohou být různě rozděleny mezi tiskovou hlavu a tiskovou podložku. Časté je rozdělení, kde tisková hlava vykonává pohyb v osách X a Z a podložka v ose Y, využívá se také pohyb tiskové hlavy v osách X a Y a podložky v ose Z. [1] [9] [15]



*Obrázek 13 Kartézská tiskárna [16]*

#### **2.3.2. Delta**

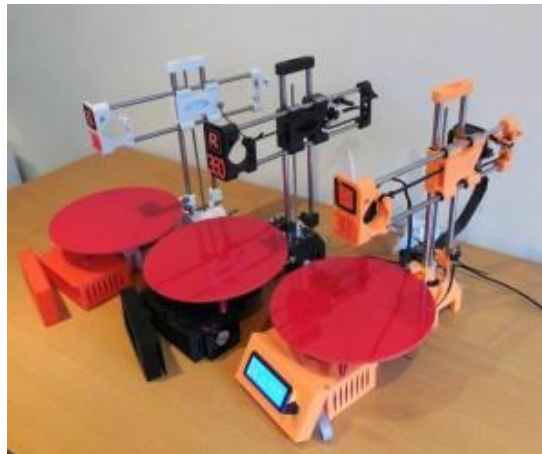
Tisková hlava je spojena pomocí ramen se třemi vertikálními pojezdy umístěnými ve vrcholech trojúhelníku. Pozice tiskové hlavy je určena posuvem držáků ramen. Tisková podložka je kruhového tvaru. [1] [9] [15]



*Obrázek 14 Delta 3D tiskárna [17]*

### **2.3.3. Polar**

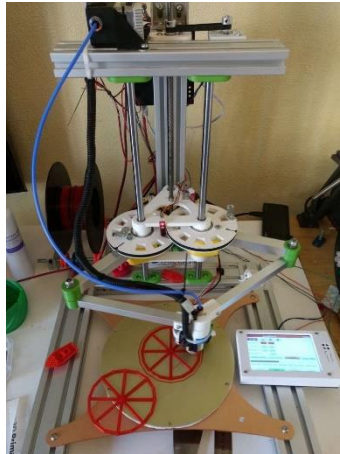
Tento typ je velice výhodný pro tisk rotačních dílců. Tisková deska je kruhového tvaru a rotuje kolem osy Z. Tisková hlava se pohybuje v ose Z a Y. Využívá tak souřadnicový systém shodný s CNC soustruhem. [1] [15]



*Obrázek 15 Polar tiskárny [15]*

### **2.3.4. Scara**

Tiskárna používá dvě ramena nebo jedno dvoukloubové pro pohyb v rovině XY. Celá konstrukce s rameny se pohybuje v ose Z. Tisková deska zůstává stacionární. Lze koncepčně řešit pro více tiskových desek umístěných kolem posuvu osy Z. [15]



*Obrázek 16 Scara tiskárna [18]*

### **2.3.5. Pásové 3D tiskárny**

Tisková plocha je v tomto typu tiskáren tvořena pásem, ten může být vyhříván pro lepší přilnavost výtisků a jejich optimálnější chladnutí. Tisková hlava se pohybuje po rovině XY, která je nakloněna vůči pásu pod úhlem přibližně 30°. Pás tak funguje jako posuv „osy Z“, mění tedy vzdálenost výtisků od trysky. Pásový koncept lze také kombinovat s delta uložením tiskové hlavy. Tato konstrukce umožňuje kontinuální tisk dílů, nebo tisk dlouhých dílů, například nosníků. [19]



*Obrázek 17 Pásová tiskárna [19]*



### 3. Dostupné díly

Na trhu je k dispozici řada dílů určených přímo pro 3D tiskárny. Je na výběr mnoho druhů extruderů, hotendů a vyhřívaných tiskových desek. Pro konstrukci rámu jsou vhodné hliníkové profily, protože umožňují jednoduchou změnu velikosti tiskárny.

#### 3.1. Extrudery

V závislosti na ceně jsou dostupné extrudery vyráběné z plastu či kovů. Pro tisk flexibilních materiálů jsou vhodné extrudery, které jsou přímo propojeny s hotendem. Cenově se extrudery pohybují od 200 Kč do několika tisíc. Dražší extrudery bývají dodávány jako komplet s hotendem a krokovým motorem, jako set pro přímé dodávání filamentu. Extrudery se liší podle průměru filamentu, obvyklý průměr je 1,75 mm. [6]

##### 3.1.1. Přímé extrudery

Tento typ extruderu je přímo spojený s hotendem a je tak součástí tiskové hlavy. Toto řešení je výhodné, umožňuje rychlejší tisk a kratší retrakci filamentu. Přímý způsob podávání také velmi snadno tiskne flexibilní materiály. Pro tento účel lze použít bodnové extrudery a přidat je na vozík hotendu, nebo využít typizovaná řešení.

##### 3.1.1.1. Titan Aero Extruder

Kompaktní řešení kombinující extruder Titan a hotend V6. Extruder využívá převodu 1:3 a jedno poháněcí kolo a přítlačnou kladku. Extruder je poháněn krokovým motorem Nema 17 a je určen pro 1,75 filament. Hotend V6 umožňuje tisknout materiály při teplotách vyšších než 300 °C. Součástí je také termistor Semitec 104GT2. Cena kompletu se pohybuje kolem 3500 Kč. Při pořízení po dílech je cena přibližně poloviční. [20]



Obrázek 18 Titan Aero Extruder [20]



### 3.1.1.2. E3D Hemera

Kompletní řešení extruderu a hotendu. Extruder využívá dvou hnacích kol pro lepší podávání filamentu. Využívá převodu 1:3 a vlastní krokový motor s přírubou Nema 17. Přítlačnou sílu zajišťuje pružina, celý přítlačný mechanismus lze aretovat. S tímto extruderem je kompatibilní V6 Volcano a SuperVolcano heatery. Cena je přibližně 4000 Kč. [21]



Obrázek 19 E3D Hemera [21]

### 3.1.2. MK8 přímý Extruder

Konstrukčně shodný s MK8 extruderem, avšak doplněný o chladič. Cenově velmi dostupná varianta. Určen pro 1,75 mm filament.

### 3.1.3. Bovdenové extrudery

V tomto případě není extruder přímo spojen s hotendem, ale je s ním spojen pomocí bovdeny obvykle tvořené teflonovou trubicí pro snížení tření mezi bovdenem a filamentem. Extruder může být připevněn k rámu nebo k portálu tiskové hlavy.

#### 3.1.3.1. BMG extruder

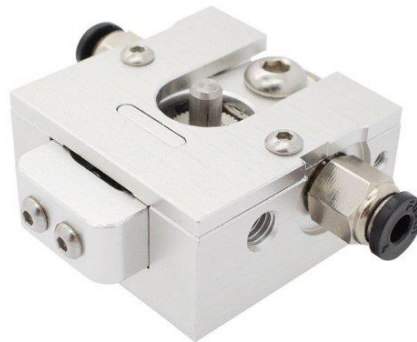
Extruder s převodem 1:3 pro snížení zátěže na motor. K posuvu filamentu využívá dvě poháněná kola umístěná proti sobě. K regulaci přítlaku filamentu slouží šroub. K pohonu filamentu je vhodný krokový motor Nema 17 s 5 mm hřídelí. Extruder je vhodný pro 1,75 mm filamenty. Pro připojení bovdeny je součástí extruderu fitinka pro trubicí s průměrem 4 mm. Cena extruderu se pohybuje kolem 500 Kč. [22]



*Obrázek 20 BMG extruder [23]*

### **3.1.3.2. Bulldog extruder**

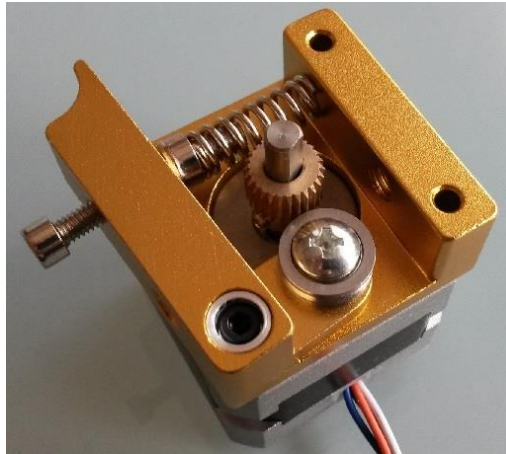
Hnací kolo je přímo na výstupní hřídeli krokového motoru. Filament je přitlačován pomocí kladky k hnacímu kolu, přitlačná síla je vyvozována pružinou. Extruder je vhodný pro 1,75 mm filament, doporučeným krokovým motorem je Nema 17. Ke spojení s extruderem slouží teflonová trubice s průměrem 4 mm usazená ve fitince. Cena se pohybuje kolem 450 Kč. [24]



*Obrázek 21 Bulldog extruder [24]*

### **3.1.3.3. MK8 extruder**

Základní typ extruderu, který využívá pákového mechanismu s pružinou a kladkou k přitlačení filamentu k hnacímu kolu. Hnací kolo je uloženo na hřídeli krokového motoru. Extruder určen pro 1,75 mm filament, vyráběn v pravém a levém provedení. Ke spojení s extruderem slouží teflonová trubice s průměrem 4 mm usazená ve fitince. Cena je přibližně 280 Kč. [25]



*Obrázek 22 Jednoduchý extruder [25]*

### **3.2. Hotendy**

Hotend přímo ovlivňuje kvalitu tisku, pro tisk co největšího množství typů materiálu by měl být schopen dosáhnout teploty okolo 300 °C. Vyrábí se opět v cenových hladinách od několika stovek po několik tisíc. Cena je opět podmíněna kvalitou zpracování a použitými materiály. Skládají se z několika základních částí, a to z heatbreaku, chladiče, topného tělesa, teploměru, trysky a ventilátoru k chlazení chladiče. [6]

### **3.3. Tiskové podložky**

Výhřevné těleso může být součástí desky, tak jsou řešeny PCB výhřevné podložky, tělo je součástí desky také u MICA topných těles. Oba zmíněné typy obsahují teploměr pro regulaci. [26]

Lze jej k desce také přilepit, nebo přišroubovat. Výhřevná tělesa mohou být v polyamidovém nebo silikonovém obalu. Součástí těchto těles je také teploměr sloužící k jejich regulaci. Další z možností elektrického ohřevu podložky je rozmístění odporových topných těles na její spodní stranu. Toto řešení však není optimální z důvodu nerovnoměrného ohřevu desky a jejímu možnému zkroucení. [26]

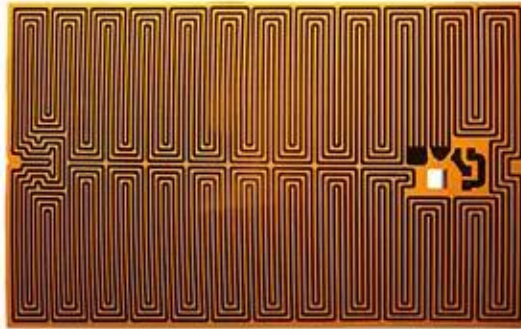
#### **3.3.1. Deska vyhřívána pomocí tištěného spoje (PCB)**

Vyhřívání podložky s vyhříváním pomocí plošného spoje bývají k dispozici nejčastěji v rozměrech 235 x 235 a 310 x 310 mm. Pro stavebnicové řešení tiskárny nejsou příliš vhodné kvůli omezenému rozsahu velikostí a nutnosti vyrábět je zakázkově. [26]

#### **3.3.2. Polyimidové výhřevné fólie**

Vyrábí se v množství velikostí a tvarů dle požadavků zákazníka. Fólie je průhledná a teplotně stabilní. Výrobce Hotlong uvádí maximální rozměr 1000 x 500 mm, tloušťka do

0,5 mm a maximální teplotu ohřevu 180 °C. Společnost Sinomas udává šířku dle šířky role fólie, obvykle 500 mm, délka není omezena, tloušťka do 0,2 mm a maximální teplota až 260 °C pro úpravu s hliníkovou fólií bez adhezivní vrstvy. Fólie v rozměru 100 x 100 mm lze zakoupit za cenu kolem 440 Kč. [27] [28]



*Obrázek 23 Polyimidová topná fólie [27]*

### **3.3.3. Silikonové výhřevné fólie**

Vyrábí se ve tvarech dle požadavků zákazníka, rychle se nahřívají a efektivně předávají teplo. Hotlong udává maximální rozměr 1000 x 500 mm, tloušťku v rozsahu 1 až 1,5 mm a maximální teplota je 200 °C. Sinomas vyrábí fólie do rozměru 900 x 3000 mm, do tloušťky 1,5 mm a maximální teplotu udává 250 °C. [29] [30]



*Obrázek 24 Silikonová topná fólie [29]*

## **3.4. Krokové motory**

Krokové motory zajišťují kompletní pohyb tiskárny. Jejich krok a převodování ovlivňují přesnost tisku. Jejich výkon se odvíjí od koncepce a velikosti tiskárny. Pohony mohou být také součástí řešení rámců a pojezdů samotných.

### 3.5. Rámy a pojezdy

Existuje několik firem, které se specializují na dodávky stavebnicových systémů pro konstrukce rámu různých strojů. K těmto firmám patří Item, Alutec KK, Bosch Rexroth, OpenBuilds a další. Tyto firmy vyrábí stavebnicová řešení postavená na hliníkových profilech.

Profily OpenBuilds mají V drážku pro pojezd kol. Součástí řešení Bosch Rexroth jsou také pojezdové mechanismy i s pohybovými členy. Společnost Item nabízí rovněž komplexní řešení včetně pohybových členů. Alutec KK se zaměřuje na výrobu profilů, a také jednotek lineárního vedení.

Další díly rámu lze na způsob RepRap tiskáren vyrábět pomocí 3D tisku nebo je lze vyrábět konvenčními způsoby. K těmto dílům patří držáky motorů, tiskové hlavy, desky a další spojovací komponenty mimo již zmíněné stavebnicové systémy.

#### 3.5.1. Řešení Bosch Rexroth

Bosch Rexroth nabízí kompletní řešení pro rámy sestavené z extrudovaných hliníkových profilů. Profily jsou dodávány v různých tvarech a nosnostech. Pro konstrukci tiskárny bych volil profily čtvercového a obdélníkového průřezu v rozměrech 40 x 40 mm a 40 x 80 mm, či menší. [31]

K rámu dodávají také kolejnice a pojezdové vozíky. Kolejnice jsou vyráběny ocelové a kompozitní. Další možností je vedení pomocí pojezdových kulatin uložených v hliníkových držácích v drážkách profilů. Po tomto vedení se pohybují vozíky. K těmto vedením se přidávají také lineární ložiska pro vedení po tyčích. [31] [32]



*Obrázek 25 Kolejnice s vozíkem [32]*

### 3.5.2. Řešení Item Haberkorn

Item vyrábí stavebnicové řešení z hliníkových extrudovaných profilů. Profily jsou vyráběny v různých tvarech velikostech či silách stěn průřezů. Součástí tohoto řešení jsou také různé spojovací díly a jiné součásti potřebné k sestavení rámu. [33]

K rámu dodávají také kolejnice a pojezdové vozíky. Kolejnice jsou ocelové. Další možností je vedení pomocí pojezdových kulatin uložených v držácích z hliníkové slitiny v drážkách profilů. Po tomto vedení se pohybují vozíky. Dalším typem jsou vozíky, které jezdí přímo v 8 mm drážce profilů. K těmto vozíkům je připojen ozubený řemen pro jejich pohon. [33]

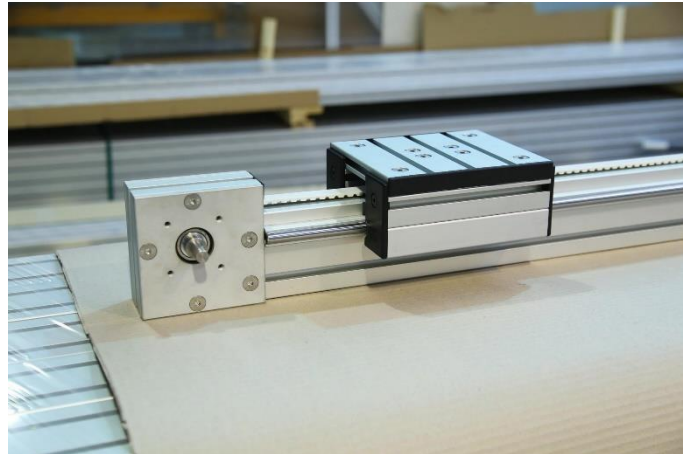


*Obrázek 26 Kladkový vozík s tyčovým vedením [33]*

### 3.5.3. Řešení Alutec KK

Česká společnost Alutec KK se zabývá výrobou extrudovaných hliníkových profilů a montážních dílů k sestavování rámu z těchto profilů. Profily jsou vyráběny v různých velikostech a silách stěn. [34]

Stejně jako ostatní výrobci těchto systémů nabízí vlastní řešení pro lineární posuvy. Lineární vedení jsou řešena pomocí vozíku, jehož součástí může být ozubený řemen či matice pro pohybový šroub. Kolejnice pro tento vozík tvoří ocelová tyč vložená v držáku, který je uchycen v drážce profilu. [35]



*Obrázek 27 Vozík s tyčovým vedením a ozubeným řemenem [35]*

### **3.5.4. Řešení OpenBuilds**

OpenBuilds vyrábí hliníkové extrudované profily malých rozměrů s V drážkou pro pojezdová kola. Dále se také zabývá kompletními řešeními pro lineární posuv. Pojezdová kola jsou složena z plastového běhounu a dvou ložisek. [10] [36]



*Obrázek 28 Kolový vozík vedený V drážkou profilu [36]*



## **4. Koncepce tiskárny**

Dle zadání se práce zabývá konstrukcí tiskárny typu FDM. Pro konstrukci stavebnicové tiskárny umožňující variabilní rozměry s malým zastavěným prostorem je vhodný kartézský typ tiskárny.

### **4.1. Rozložení posuvových os**

Tiskárna využívá kartézských souřadnic pro pohyb tiskové podložky a tiskové hlavy. Rozložení pohybů je voleno následovně: tisková hlava se bude pohybovat v rovině XY a podložka se bude posouvat směrem dolů v ose Z.

### **4.2. Návrh koncepce rámu**

Rám je vhodné konstruovat jako kvádr nebo krychli okolo celého tiskového prostoru. Tato konfigurace usnadní zakrytování tiskového prostoru pro jeho snazší vyhřívání, toto řešení umožní tisk více druhů materiálu. Horní část tohoto rámu rovněž poskytne prostor pro umístění pojezdů pro pohyb tiskové hlavy.

Rám bude složen z extrudovaných profilů od společnosti Alutec KK, toto řešení bylo zvoleno z důvodu nižší ceny dílů oproti konkurenci a poskytované knihovně do CAD programu Autodesk Inventor. Součástí řešení rámu je také systém pro uložení pojezdových kulatin a pojezdové vozíky.

Pro snížení nákladů je vhodné nakoupit pojezdové kulatiny zvlášť, obdobně budou nakoupeny také řemenice pro ozubené řemeny na pohony os XY. Pohyb pro osu Z bude zajišťovat pohybový šroub s maticí.

### **4.3. Rozložení pohonů a konstrukce pojezdů**

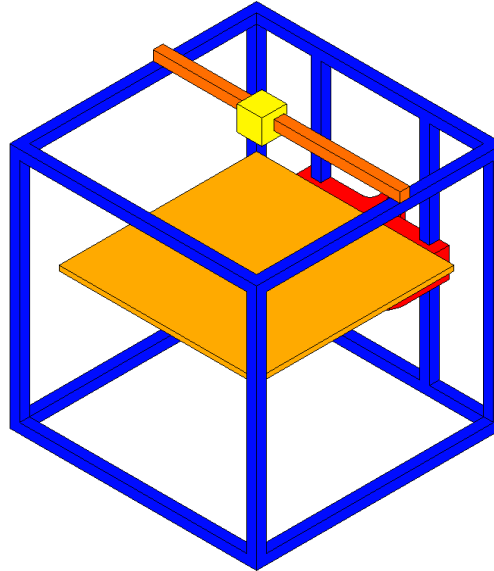
Pro pohon os jsou vhodné krokové motory, které poskytují přesné polohování. Výkon motorů se odvíjí od typu. Motory jsou napájeny stejnosměrným proudem a jejich pohyb řídí řídicí elektronika, propojená s inteligencí tiskárny. Pohyb v rovině XY lze řešit více způsoby.

#### **4.3.1. Portálové řešení pro XY**

Pohon osy X tedy portálu bude v závislosti na délce portálu poháněn z jedné či obou stran. Pro pohon z obou stran lze využít dvou elektronicky synchronizovaných motorů či jednoho a přidaného řemenového převodu. Duplicitní pohon má zabránit zpříčení portálu a zvýšit tuhost portálu.



Tisková hlava se bude pohybovat po portálu ve směru osy Y. Motor pro pohyb bude součástí konstrukce portálu. Pohon tiskové hlavy zajistí ozubený řemen, vedení pomocí pojezdových tyčí a kladek.

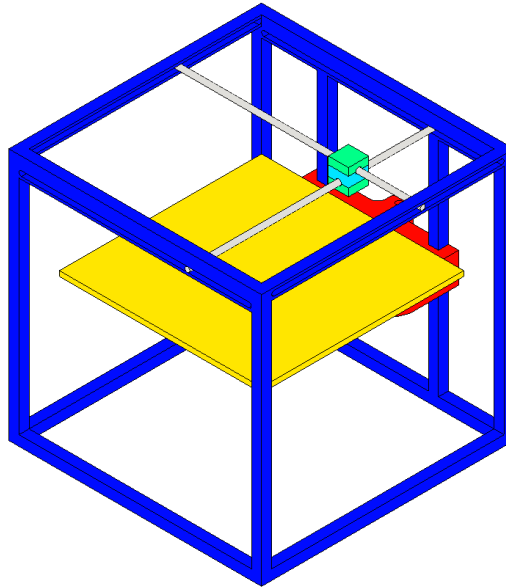


*Obrázek 29 Portál*

#### **4.3.2. Křížové uspořádání pro XY**

Tisková hlava je uložena na dvou na sobě kolmých pojezdech. Polohování je docíleno vzájemným pohybem pojezdů. Pro správné polohování je nutno pohánět oba konce každého z pojezdů. Pohyb tiskové hlavy je tedy kombinací 2 lineárních pohybů.

K vedení tiskové hlavy je vhodné použít pojezdové tyče a lineární vedení. Tyče na koncích lze uložit obdobně jako portál v předchozím případě. Tedy na vozících využívajících kladkových kol vedených pojezdovými tyčemi.



*Obrázek 30 Křížové uspořádání*

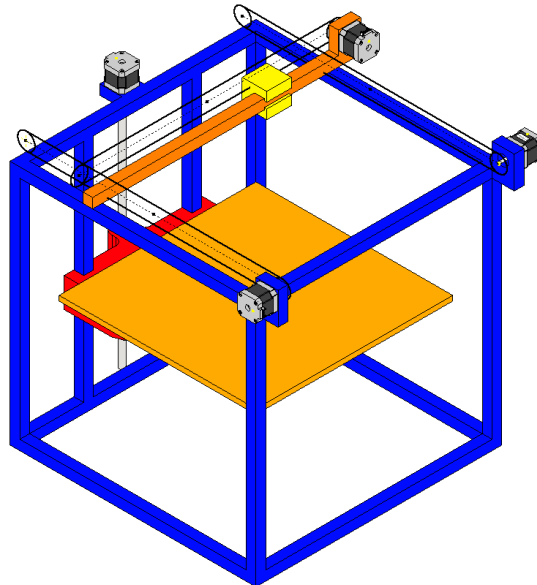
#### **4.3.3. Pojezd tiskové podložky**

Ve směru osy Z se bude pohybovat vozík na kterém bude upevněna tisková deska. Toto uložení musí být dostatečně tuhé, aby uneslo hmotnost tištěných komponent. V závislosti na velikosti tiskárny mohou vážit i několik desítek kilogramů. S ohledem na hmotnost tištěných dílů je nutno dimenzovat konstrukci vozíku a dimenzovat pohybový šroub. Pohybový šroub je vhodné uchytit tak, aby nebyl zatěžován na vzpěr. Pro větší rozměry tiskové podložky se vozík uchytil z obou stran, aby byla dosažena větší tuhost konstrukce.

#### **4.3.4. Pohon portálu**

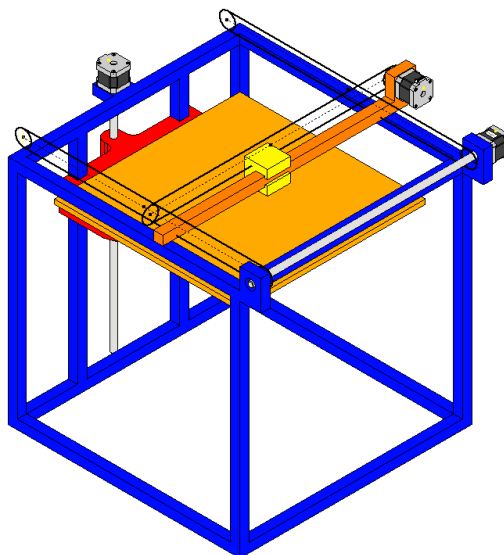
Pro pohon portálu na obou koncích lze využít dvou motorů, nebo jednoho a propojit pohony mechanicky. Toto propojení lze řešit například pomocí ozubeného řemene, nebo pomocí hřídele.

Při využití dvou motorů odpadá nutnost řešit přenos pohybu k druhému konci portálu. Toto řešení však může způsobit vzpříčení portálu v případě chyby elektronického řízení nebo motorů.



*Obrázek 31 Pohon portálu 2 motory*

Pohon jedním motorem je mechanicky složitějším řešením, odpadá zde však možnost vzpříčení způsobeného poruchou elektrického zařízení. Při využití řemenového převodu pro spojení pohonů portálu je třeba dbát na jeho správné napnutí. Přeskočení řemenů by způsobilo zkřížení portálu a nepřesnost. Při využití hřídele je třeba počítat s jeho možným doběhem a pro dlouhé hřídele také průhybem a zkroucením.



*Obrázek 32 Pohon portálu 1 motorem*

#### **4.3.5. Pohon tiskové podložky**

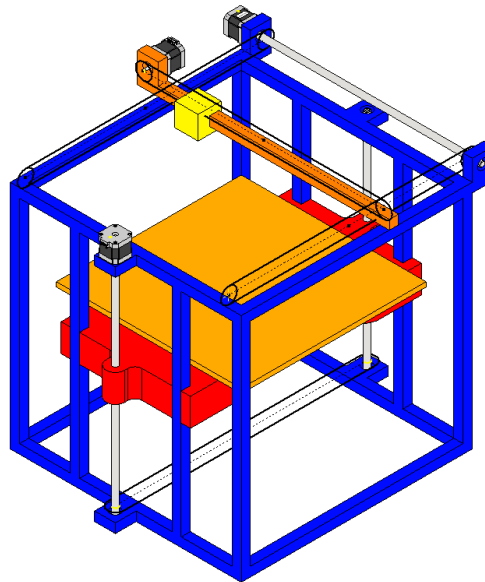
Pro pohon je vhodné využít pohybového šroubu spojeného s krokovým motorem. Toto řešení umožňuje v závislosti na použitém šroubu velmi přesné nastavení posuvu.

K převodu rotačního pohybu na posuvný se využívá lichoběžníkových nebo kuličkových šroubů.

Konzole s tiskovou podložkou je myšlena jako vetknutá, nebo oboustranně uchycená. Pro její oboustranné uchycení je dobré využít dvou posuvových šroubů. Tyto šrouby lze pohánět samostatnými motory, nebo jedním motorem a spřáhnout je pomocí ozubeného řemenu či řetězu.

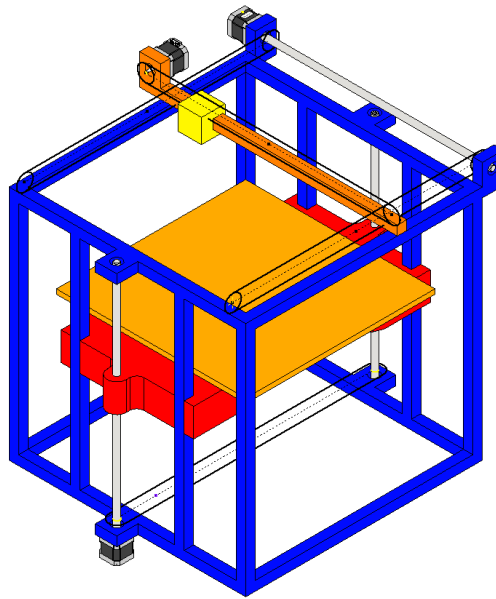
Využití řetězu sebou nese množství nevýhod. K těm patří vyšší hmotnost hnacího členu, potřeba mazání, větší setrvačnost převodu. K výhodám patří menší napínací síly a menší protažení hnacího elementu.

Pro použití na pohony 3D tiskáren jsou obvykle užívány ozubené řemeny. Z tohoto důvodu a kvůli odstranění nutnosti mazání volím ozubený řemen pro pohon posuvových šroubů. Krokový motor lze umístit na horní, nebo spodní část rámu, propojení posuvových šroubů je jednodušeji realizovatelné ve spodní části rámu pod podložkou. Řemen je nutno pro správnou funkci předeprnout. Při propojení šroubů v horní části je nutno vést řemen mimo prostor pojezdů tiskové hlavy. Toho lze docílit vedením nad tiskovou hlavou nebo okolo rámu. První varianta může způsobit problémy s vedením tiskového materiálu a druhá vyžaduje soustavu kladek a delší vedení řemenu.



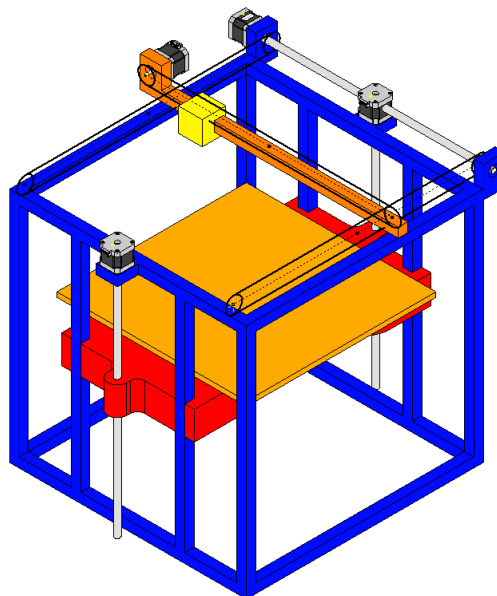
*Obrázek 33 Pohon osy Z s motorem v horní části rámu*

Umístění motoru do spodní části je příznivější variantou pro rozložení namáhání ve šroubu a také pro připojení druhého šroubu. V tomto případě nebude vzájemné nastavení ovlivněno zkroucením šroubu.



*Obrázek 34 Pohon osy Z s motorem v dolní části*

K pohonu šroubů lze použít také dva krokové motory, a tak oba šrouby propojit elektronicky. Toto řešení není tak stabilní jako využití mechanické vazby a jednoho motoru. I zde je vhodnější variantou umístit motory do spodní části rámu.



*Obrázek 35 Pohon osy Z dvěma motory*

## 5. Návrhové výpočty

Tato kapitola se zabývá návrhovými výpočty jednotlivých konstrukčních uzlů tiskárny. Vybíráním použitelných vyráběných součástí a také řešením konstrukčních uzlů. Všechny výpočty v návrhové části jsou pro variantu využívající vedení vozíku tiskové desky z obou stran a používají dva pohybové šrouby spřažené ozubeným řemenem. Pohon portálu je také realizován z obou jeho stran a řemenice jsou spojeny hřídelí.

### 5.1. Návrh osy Z

Tato část se zabývá návrhovými výpočty jednotlivých konstrukčních uzlů. Dále také volbou vhodných komponent, či jejich rozměrů. Součástí této části je tedy volba velikosti profilů pro rám tiskové desky, rozměr pohybových šroubů, volba ložisek a krokových motorů.

#### 5.1.1. Návrh rámu tiskové desky

Rám je potřeba dimenzovat pro nejvyšší možné zatížení podložky. Pro zjednodušení výroby je vždy volen jeden rám pro každý rozměr tiskové plochy. Výška tiskového prostoru je tedy vždy brána jako maximální, tedy 1000 mm. Spojité zatížení je bráno viz tabulka 2 a počítáno z maximální hmotnosti tištěného dílu, který vyplňuje největší tiskový prostor dané podložky z 50 %. Jako materiál je bráno PLA s hustotou 1250 kg/m<sup>3</sup>.

$$m_{ij} = \frac{\rho \cdot X_i \cdot Y_i \cdot Z_j}{2} \cdot 10^{-9} \quad (1)$$

Hodnota  $m_i$  je hmotnost tištěného dílu vyplňujícího polovinu tiskového prostoru tiskárny. Hodnoty  $X_i$ ,  $Y_i$  a  $Z_j$  symbolizují rozměry tiskového prostoru,  $\rho$  je hustota tištěného plastu.

Tabulka 1 Hmotnosti tištěných dílů

	Z <sub>j</sub> [mm]	Hmotnost tištěného dílu [kg]								
		200	300	400	500	600	700	800	900	1000
200x200	m <sub>1</sub>	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00
300x300	m <sub>2</sub>	11,25	16,88	22,50	28,13	33,75	39,38	45,00	50,63	56,25
400x400	m <sub>3</sub>	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00
500x500	m <sub>4</sub>	31,25	46,88	62,50	78,13	93,75	109,38	125,00	140,63	156,25
600x600	m <sub>5</sub>	45,00	67,50	90,00	112,50	135,00	157,50	180,00	202,50	225,00
700x700	m <sub>6</sub>	61,25	91,88	122,50	153,13	183,75	214,38	245,00	275,63	306,25
800x800	m <sub>7</sub>	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00	280,00	320,00	360,00	400,00
900x900	m <sub>8</sub>	101,25	151,88	202,50	253,13	303,75	354,38	405,00	455,63	506,25
1000x1000	m <sub>9</sub>	125,00	187,50	250,00	312,50	375,00	437,50	500,00	562,50	625,00

*Tabulka 2 Spojité zatížení na rám tiskové desky*

Tisková plocha X x Y [mm]								
200 x 200	300 x 300	400 x 400	500 x 500	600 x 600	700 x 700	800 x 800	900 x 900	1000 x 1000
Spojitě zatížení q [kg/mm]								
0,125	0,1875	0,25	0,313	0,375	0,438	0,5	0,563	0,625

Následující tabulka zobrazuje hodnoty vypočítané pomocí online kalkulátoru ze stránek Alutec KK. Online kalkulátor využívá následující rovnice. Hodnota  $L_p$  je délka nosníku pro tiskovou podložku a  $f_i$  označuje maximální průhyb.  $I$  [cm<sup>4</sup>] označuje moment setrvačnosti,  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] je modul pružnosti a hodnota  $W$  [cm<sup>3</sup>] symbolizuje průřezový modul v ohybu. Síla  $F_o$  je kombinací sil od zatížení a vlastní hmotnosti. [37]

$$f_i = \frac{q \cdot L_D^4 \cdot g}{192 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} + \frac{m_{vi} \cdot L_D^4 \cdot g}{384 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} \quad (2)$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\sigma = \frac{F_o \cdot L_D}{8 \cdot W \cdot 10^3} \quad (3)$$

*Tabulka 3 Průhyb a namáhání rámu tiskové desky, výpočet viz Alutec KK [37]*

$L_p$ [mm]	Profil 1	Profil 2	Průhyb $f_1$ [mm]	Průhyb $f_2$ [mm]	$\sigma_o$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_o$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Profil 1 kód	Profil 2 kód
260	30x30	30x60	0,005		2,161		200	103030	103060
360	30x30	30x60	0,024		6,187		200	103030	103060
460	30x30	30x60	0,085		13,438		200	103030	103060
580	40x40	40x80	0,048		6,388		200	104040	104040
680	40x40	40x80	0,108		10,512		200	104040	104040
780	40x40	40x80		0,032		6,388	200	104040	104080
880	40x40	40x80		0,58		6,767	200	104080	104080
980	40x40	40x80		0,101		9,425	200	104080	104080
1090	45x45	45x90		0,13		10,998	200	104590	104590

Pro volbu profilů rámu je velmi důležitá hodnota průhybu. Průhyb přímo ovlivňuje přesnost tisku, za mezní lze brát hodnotu průhybu 0,1 mm. Pro výpočet průhybu a napětí vzorec zohledňuje také zatížení od vlastní hmotnosti profilů. Profily jsou pro výpočty brány jako oboustranně vetknuté.

### 5.1.2. Návrh pohybových šroubů

Pro návrh pohybových šroubů je nutné zohlednit možnou hmotnost tištěných dílů, hmotnost konstrukce s tiskovou podložkou, počet a typ pohybových šroubů. Pohybové šrouby jsou voleny rovnoramenné lichoběžníkové (TrDxP). Následující tabulka zobrazuje

hmotnosti tisknutých dílců. Maximální hmotnost tištěných dílů je uvažována jako hmotnost plastového dílu, který vyplňuje polovinu tiskového prostoru. Tiskovým materiálem pro tento výpočet je zvoleno PLA s hustotou 1250 kg/m<sup>3</sup>. K této hmotnosti je připočtena také hmotnost rámu a tiskové desky.

Tabulka 4 Odhad hmotnosti vozíků

$m_{v1}$ [kg]	$m_{v2}$ [kg]	$m_{v3}$ [kg]	$m_{v4}$ [kg]	$m_{v5}$ [kg]	$m_{v6}$ [kg]	$m_{v7}$ [kg]	$m_{v8}$ [kg]	$m_{v9}$ [kg]
4	8,5	14,5	25,7	35,5	50	63	78	90

Na základě údajů z tabulek číslo 1 a číslo 4 je dále volena velikost pohybových šroubů, typ krokového motoru etc. Dle rozměru pohybového šroubu a jeho zatížení je určen potřebný motor a k němu připojený řemenový převod. Typ řemenu se odvíjí od síly, kterou je schopen přenést a také od jeho prodloužení, aby nedošlo k přílišnému vzájemnému pootočení pohybových šroubů.

$$d'_{2ij} = \sqrt{\frac{(m_{vj} + m_{ij}) \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot \psi_H \cdot \psi_h \cdot p_d}} \quad (4)$$

$$\psi_H = 0,5$$

$$\psi_h = 2$$

$$p_d = 12 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Tabulka 5 Průměry šroubů

		$d_2'$ [mm]								
X x Y [mm]	Z [mm]	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
200x200	$d_1$	1,92	2,17	2,39	2,60	2,79	2,96	3,13	3,29	3,44
300x300	$d_2$	2,84	3,22	3,56	3,87	4,16	4,42	4,68	4,92	5,14
400x400	$d_3$	3,76	4,26	4,72	5,13	5,52	5,88	6,22	6,54	6,84
500x500	$d_4$	4,82	5,45	6,00	6,51	6,99	7,43	7,85	8,25	8,62
600x600	$d_5$	5,74	6,49	7,16	7,78	8,35	8,88	9,39	9,86	10,32
700x700	$d_6$	6,74	7,62	8,40	9,11	9,77	10,40	10,98	11,54	12,07
800x800	$d_7$	7,65	8,65	9,55	10,37	11,13	11,84	12,51	13,15	13,76
900x900	$d_8$	8,56	9,69	10,71	11,63	12,49	13,29	14,05	14,77	15,45
1000x1000	$d_9$	9,37	10,65	11,79	12,83	13,79	14,68	15,53	16,33	17,10

Úhel  $\gamma$  značí stoupání závitu, úhel  $\beta$  je polovina vrcholového úhlu profilu závitu, hodnota  $f$  označuje součinitel tření a úhel  $\varphi'$  je třecí úhel. Když je třecí úhel větší, než úhel stoupání je závit samosvorný. V tomto případě je tedy samosvorný pouze závit Tr 20x4. Hodnota  $M_{k\dot{s}}$  označuje moment potřebný pro pohyb šroubu pod myšlenou plnou zátěží. Hodnota  $Q$  je síla působící v ose šroubu.



$$\gamma_i = \tan^{-1} \left( \frac{i \cdot P}{\pi \cdot d_2} \right) \quad (5)$$

$$\beta = 15^\circ$$

$$\beta_i' = \tan^{-1}(\tan \beta \cdot \cos \gamma_i) \quad (6)$$

$$f = 0,08$$

$$\varphi' = \tan^{-1} \frac{f}{\cos \beta_i'} \quad (7)$$

*Tabulka 6 Typy šroubů [38] [39]*

Tr8x8	i	4	$\gamma_1$	19,991°	$\varphi'_1$	4,716°	Cena [Kč/m]	439
	P [mm]	2						
	$d_2$ [mm]	7						
Tr16x4	i	1	$\gamma_2$	5,197°	$\varphi'_2$	4,733°	Cena [Kč/m]	265
	P [mm]	4						
	$d_2$ [mm]	14						
Tr20x4	i	1	$\gamma_3$	4,046°	$\varphi'_3$	4,733°	Cena [Kč/m]	385
	P [mm]	4						
	$d_2$ [mm]	18						

$$M_{kš} = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma + \varphi') \quad (8)$$

*Tabulka 7 Momenty potřebné pro otočení šroubů*

X x Y [mm]	$M_{kš}$ [Nmm]									
	Z [mm]	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
200x200		142	182	221	261	300	340	379	419	459
300x300		312	401	490	579	668	757	846	935	1024
400x400		545	704	862	1020	1178	1336	1494	1652	1810
500x500		900	1147	1394	1642	1889	1624	1812	2000	2188
600x600		968	1238	1509	1779	2050	2320	2591	2862	3132
700x700		1338	1706	2074	2442	2810	3179	3547	3915	4283
800x800		1719	2200	2681	3162	4132	4678	5223	5769	6314
900x900		2445	3135	3825	4516	5206	5897	6587	7277	7968
1000x1000		2932	3784	4637	5489	6341	7194	8046	8898	9751

### 5.1.3. Matice

Vzhledem k vertikální poloze pohybového šroubu dojde k vymezení vůle v závitech působením síly od hmotnosti konstrukce tiskové desky. Díky tomu lze volit obyčejné přírubové matice. Pro rozměry nad Tr12x3 jsou vyráběny normalizované matice dle normy DIN 103. Pro závit Tr8x8 lze zakoupit matice i šrouby v obchodech specializovaných pro 3D tiskárny.

*Tabulka 8 Trapézové přírubové matice [40] [41]*

Výrobce	Norma	Závit	Materiál	Výška matice [mm]	Průměr příruby [mm]	Vnější průměr [mm]	Počet děr na přírubě	Průměr děr	Roztečný průměr [mm]	Cena [Kč]
		Tr8x8	Bronz	15	26	10	4	3,5	15,5	79
Gradel Baudin	DIN 103	T16x4	Bronz	35	48	28	6	M5	38	926
Gradel Baudin	DIN 103	Tr20x4	Bronz	44	55	32	7	M6	45	1280

#### 5.1.4. Řemenový převod pro osu Z

Řemen spojuje pohybové šrouby mechanickou vazbou, jeden motor tak pohání oba pohybové šrouby. U volby řemenu je brán důraz na jeho minimální protažení. Vzájemné pootočení šroubů by způsobovalo nepřesné polohování podložky nebo dokonce vzpříčení vozíku tiskové desky. Chování řemenů v této oblasti považují za lineární.

*Tabulka 9 Tuhosti řemenů [42]*

HTD			
3M	5M		
k [N/mm]			
M HP	M HF	M HP	M HS
7500	7500	20000	35000

$$F_{\check{r}i} = \frac{M_{k\check{s}i}}{D_{pi}} \quad (9)$$

$$k_{ri} = k \cdot \frac{b_i}{A_{\check{r}i}} \quad (10)$$

$$\Delta L_i = \frac{F_{\check{r}i}}{k_{ri}} \quad (11)$$

$$\alpha_i = \Delta L_i \cdot \frac{360}{\pi \cdot D_{pi}} \quad (12)$$

$$\Delta Z_i = \alpha_i \cdot \frac{i_i \cdot P_i}{360} \quad (13)$$

*Tabulka 10 Tabulka řemenic a protažení řemenů [43]*

z	Šířka [mm]	$D_p$ [mm]	Typ řemenice	$F_r$ [N]	$A_r$ [mm]	b [mm]	Tuhost $k_r$ [N/mm]	Protažení $\Delta L$ [mm]	Úhel $\alpha$ [°]	Posun Z [mm]
18	15	28,65	18-05M-15	16,00	300	9	600	0,03	0,11	0,002
18	15	28,65	18-05M-15	35,73	400	9	450	0,08	0,32	0,007
18	15	28,65	18-05M-15	63,19	500	9	360	0,18	0,70	0,016
30	15	47,75	30-05M-15	45,81	620	9	290	0,16	0,38	0,004
30	15	47,75	30-05M-15	65,59	720	9	250	0,26	0,63	0,007
30	15	47,75	30-05M-15	89,70	820	9	220	0,41	0,98	0,011
48	15	76,39	48-05M-15	82,66	920	12	261	0,32	0,48	0,005
48	15	76,39	48-05M-15	104,30	1020	12	235	0,44	0,66	0,007
48	15	76,39	48-05M-15	127,65	1130	12	212	0,60	0,90	0,010

K síle v řemenu  $F_r$  je následně nutno přidat sílu, která je vyvozena napínáním řemene. Vzájemné pootočení pohybových šroubů a tím vzniklé posunutí je zanedbatelné. Protažení řemene od napínání by nemělo mít vliv na vzájemnou polohu šroubů. Je však třeba počítat s větší silou, kterou tak musí řemen přenést.

Pro přenos momentu bude vhodné využít nekonečný řemen. Ty jsou vyráběny v rozměrových řadách, k tomu je třeba přihlídnout při umístění os. Rozměr  $A_r$ , tedy osová vzdálenost pohybových šroubů, je orientační pro účel návrhového výpočtu.

### 5.1.5. Volba krokových motorů pro osu Z

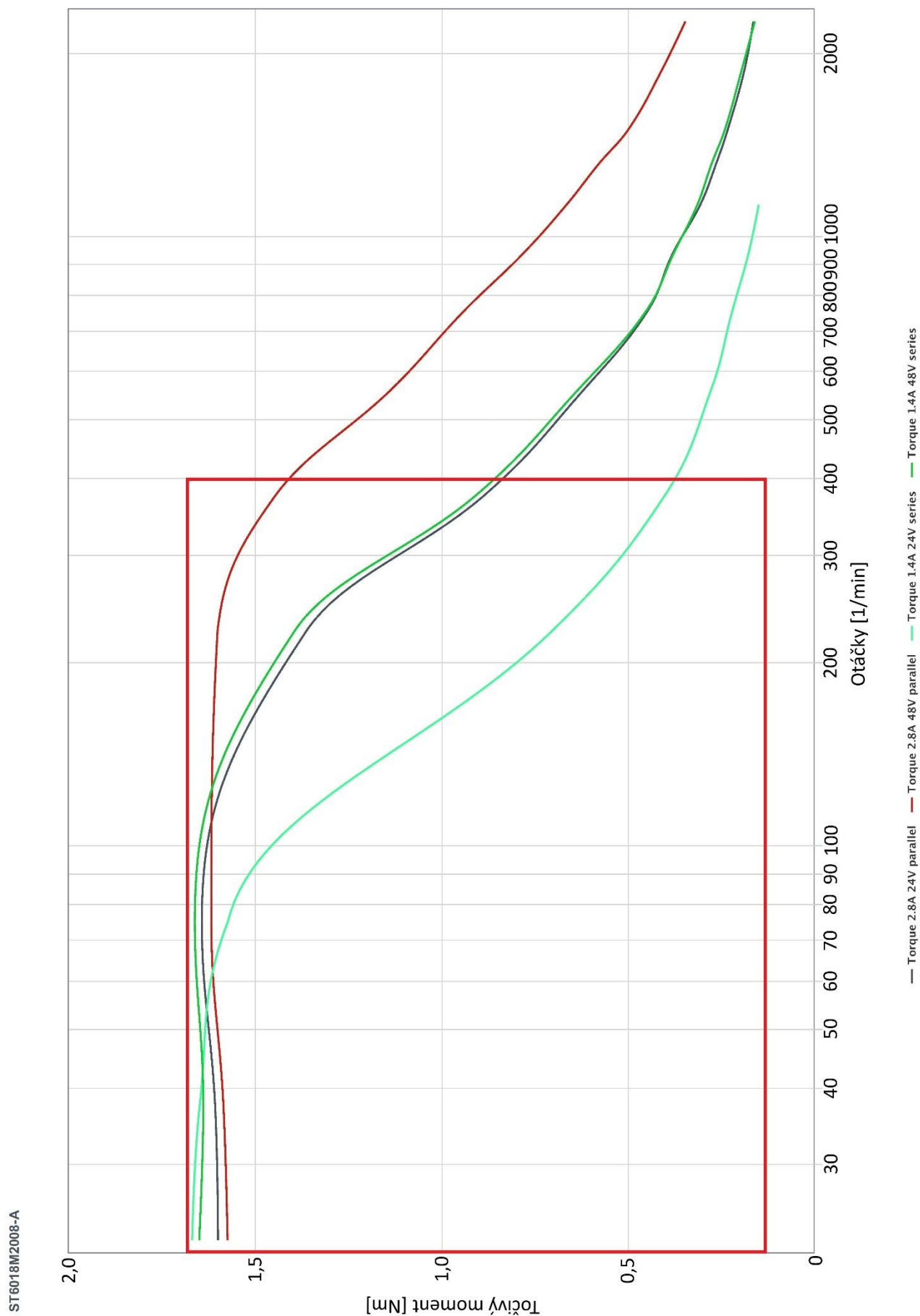
Krokové motory je nutno volit s ohledem na jejich přídržovací moment, ten musí být vyšší než moment potřebný pro otočení šroubu. Dalším důležitým parametrem výběru je točivý moment motoru, ten je přímo závislý na otáčkách motoru. Pro určení polohovacích možností motoru je důležitým parametrem délka kroku.

Z použitých posuvových šroubů je samosvorný pouze šroub se závitem Tr 20x4. U ostatních by v případě ztráty napájení došlo vlivem hmotnosti tištěného dílu a sestavy tiskové desky k posuvu dolů ke spodním dorazům.

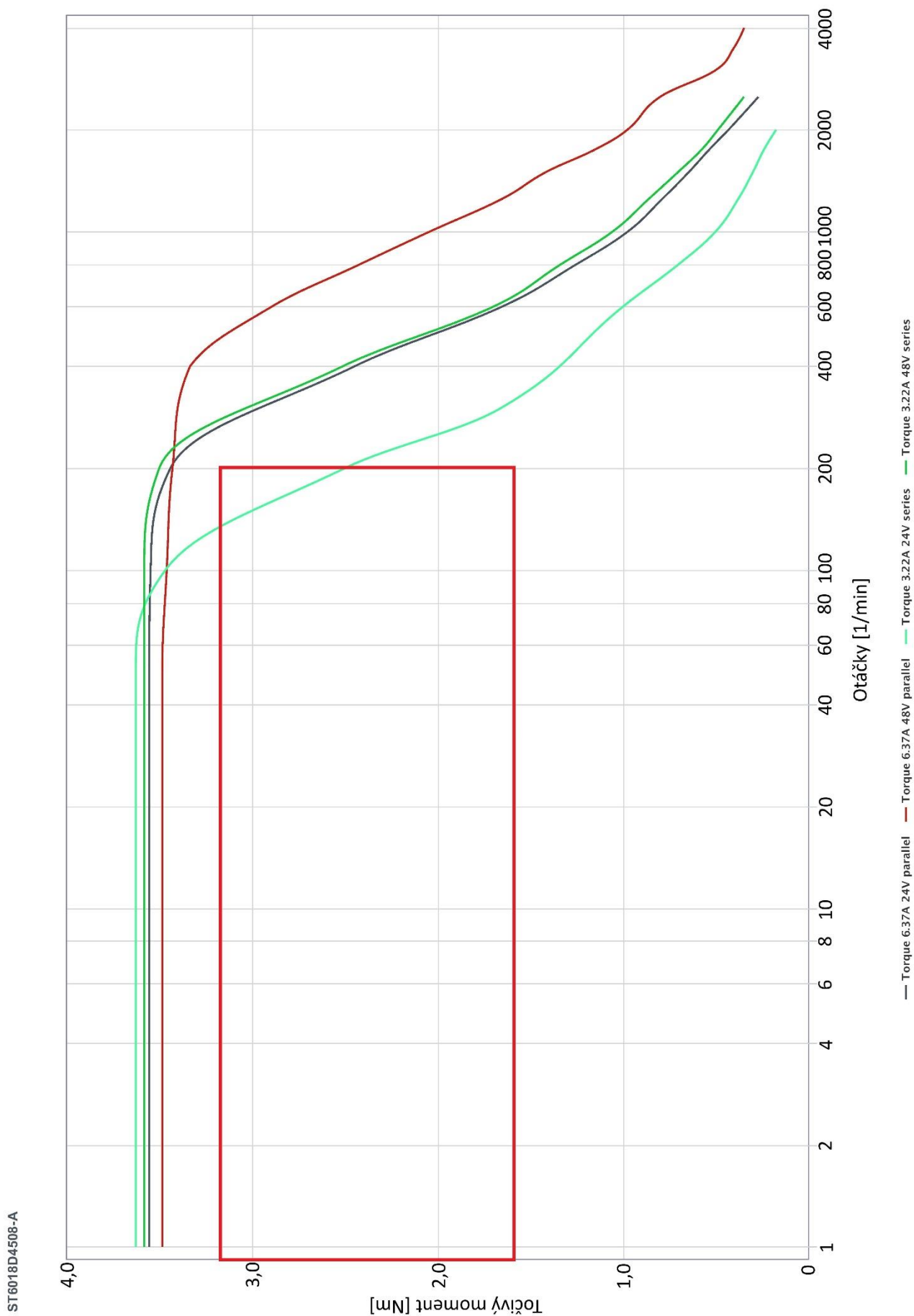
*Tabulka 11 Krokové motory Nanotec [44] [45] [46]*

Typové označení	NEMA	Přídržovací moment [Nmm]	Napájecí napětí [V]	délka kroku [°]	Hřídel [mm]	Cena za 1 kus [€]	Posunutí na šroubu [mm/krok]
ST6018M2008-A	24	1951	24/48	1,8	Ø8x19	57,90	0,04
ST6018D4508-A	24	4002	24/48	1,8	Ø8x19	121,70	0,02
ST8918D6708-A	34	12021	24/48	1,8	Ø14x35	205,70	0,02

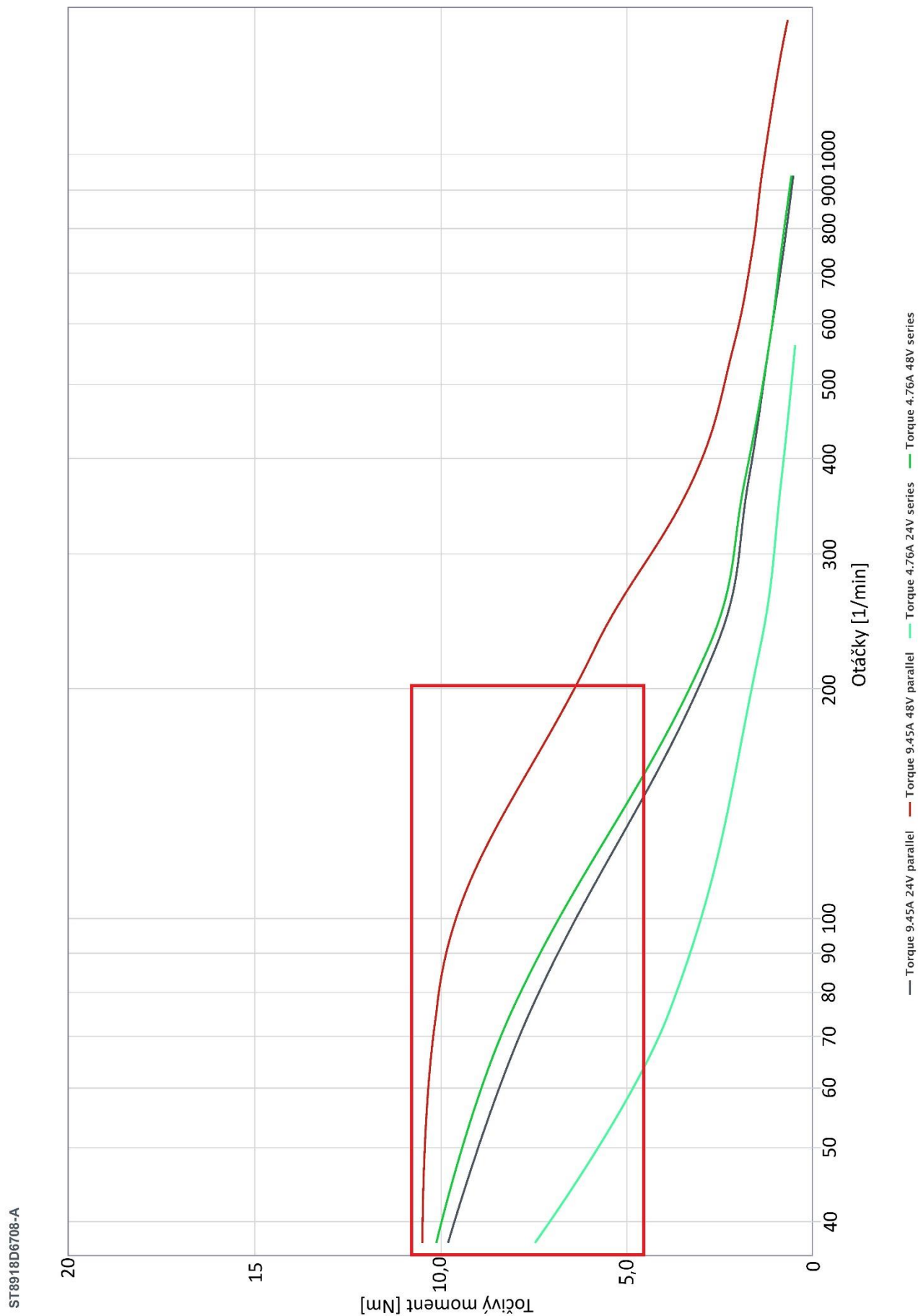
Následující grafy zobrazují průběh momentu krokových motorů v pracovním rozsahu otáček.



Obrázek 36 Průběh momentu motoru ST6018M2008-A [44]



Obrázek 37 Průběh momentu na motoru ST6018D4508-A [45]



Obrázek 38 Průběh momentu motoru ST8918D6708-A [46]

Rozsah otáček krokového motoru je volen s ohledem na potřebnou rychlost posuvu pro zatížený stav. V nezatíženém stavu při pohybu vzhůru jsou otáčky limitovány pouze momentem potřebným pro pohyb samotné desky. Nejvyšší moment krokového motoru je potřebný právě v minimálních otáčkách, vzhledem ke směru pohybu tiskové desky je využíván zejména k překonání pasivních odporů šroubového mechanismu.

### 5.1.6. Volba axiálních ložisek

Pohybové šrouby jsou uloženy v horní části rámu pomocí axiálního ložiska. Toto uložení šroubů zlepšuje rozložení sil, které na ně působí. Část nad maticí je namáhána pouze tahem a druhá část na krut. Díky tahovému namáhání není potřeba řešit šroub ve vzpěru, a tak může mít menší průřez.

Ložiska jsou volena, aby vydržela střední zatížení od síly  $F_{25\%}$  po dobu minimálně 20 000 hodin a plně po dobu 5 000 hodin. Pro nejmenší průměr závitu je využito jehlového ložiska, pro další dva typy šroubů se využívá kuličkových axiálních ložisek.

$$F_{A/Bi} = \frac{q \cdot l}{2} \quad (14)$$

Tabulka 12 Síla ve šroubech

X x Y [mm]	Z [mm]	Síla ve šroubech [N]								
		200	300	400	500	600	700	800	900	1000
200x200	$F_{A/B1}$	44	56	69	81	93	105	118	130	142
300x300	$F_{A/B2}$	97	124	152	180	207	235	262	290	318
400x400	$F_{A/B3}$	169	218	267	316	365	414	464	513	562
500x500	$F_{A/B4}$	279	356	433	509	586	663	739	816	892
600x600	$F_{A/B5}$	395	505	616	726	836	947	1057	1167	1278
700x700	$F_{A/B6}$	546	696	846	996	1147	1297	1447	1597	1747
800x800	$F_{A/B7}$	701	898	1094	1290	1486	1682	1879	2075	2271
900x900	$F_{A/B8}$	879	1128	1376	1624	1872	2121	2369	2617	2866
1000x1000	$F_{A/B9}$	1055	1361	1668	1974	2281	2587	2894	3201	3507

$$L = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{F}\right)^p \quad (15)$$

$F_{25\%}$  je síla která je rovna 25 % maximální síly pro každou velikost desky z tabulky 12. Síly pro jednotlivé typy šroubů, tedy i ložisek jsou barevně odděleny a vychází ze zatížení tiskové podložky tištěným dílem z PLA o hustotě 1250 kg/m<sup>3</sup>, který vyplňuje 50 % tiskového objemu u každého z rozměrů. Toto zatížení je považováno za plné zatížení.

Maximální zatížení je bráno od tištěného dílu vyplňujícího 50 % tiskového objemu největšího rozměru tiskového prostoru, u kterého je využito daného pohybového šroubu. Je to krajní hodnota, která se nepředpokládá v běžném provozu.

$$F_{25\%} = 0,25 \cdot \frac{F_{A/Bi}}{1000} \quad (16)$$

Tabulka 13 Axiální ložiska SKF [47]

Závit	malý průměr d3 [mm]	Typ ložiska	Malý průměr ložiska [mm]	Dynamická únosnost C [kN]	Statická únosnost C <sub>0</sub> [kN]	F <sub>25%</sub> [kN]	F <sub>max</sub> [kN]	Trvanlivost L [Hod]	
Tr8x8	5,5	AXK 0515 TN	5	4,5	9,5	0,04	0,59	565 170 059	49 661
Tr8x8	5,5	AXK 0515 TN	5	4,5	9,5	0,08	0,59	38 848 408	49 661
Tr8x8	5,5	AXK 0515 TN	5	4,5	9,5	0,14	0,59	5 809 706	49 661
Tr16x4	11,5	51100	10	9,95	15,3	0,22	1,75	17 473 001	10 257
Tr16x4	11,5	51100	10	9,95	15,3	0,32	1,75	5 282 611	10 257
Tr16x4	11,5	51100	10	9,95	15,3	0,44	1,75	1 860 765	10 257
Tr20x4	15,5	51202	15	15,9	25	0,57	3,51	3 705 537	5 177
Tr20x4	15,5	51202	15	15,9	25	0,72	3,51	1 706 575	5 177
Tr20x4	15,5	51202	15	15,9	25	0,88	3,51	870 498	5 177

### 5.1.7. Napínání řemenu a volba ložisek

Napínací síla je počítána pro hnací řemeny ContiTech typu Synchroforce CXP a bude vyvozována pomocí napínací ramínkové kladky umístěné na ploché straně řemene. K výpočtu napínací síly bylo využito online kalkulátoru na stránkách výrobce řemenů ContiTech. Toto umístění je voleno z důvodu obousměrného chodu a dle doporučení výrobce.

Ložiska jsou volena dle průměru, vzhledem k malým silám dosahují velké životnosti. Pro průměry hřídel nad 12 mm lze využít ložiskových jednotek. Využitím ložiskové jednotky se zjednoduší konstrukce uložení ložisek.



*Tabulka 14 Napínací síly řemene volba ložisek [48]*

$F_f$ [N]	Napínací síla $F_{Nap}$ [N]	Síla na ložiska $F_{Ldyn}$ [N]	Dynamická únosnost $C$ [kN]	Statická únosnost $C_0$ [kN]	Malý průměr $d$ [mm]	Typ ložiska	Trvalnost $L$ [Hod]
16,00	76	117	2,34	0,95	5	635-2RS1	444 444
35,73	76	117	2,34	0,95	5	635-2RS1	444 444
63,19	95	147	2,34	0,95	5	635-2RS1	224 090
45,81	97	149	4,62	1,96	10	63000-2RS1	1 656 131
65,59	111	170	4,62	1,96	10	63000-2RS1	1 115 082
89,70	127	196	4,62	1,96	10	63000-2RS1	727 587
82,66	166	255	5,59	2,85	15	63002-2RS1	585 251
104,30	181	278	5,59	2,85	15	63002-2RS1	451 678
127,65	198	305	5,59	2,85	15	63002-2RS1	342 029

Životnosti vychází v řádu stovek tisíc hodin z důvodu malých působících sil. Ložiska jsou volena tak, aby dobře seděla na průměru menším, než je malý průměr závitů, ale zároveň nevznikl příliš velký vrub. Malé průměry závitů jsou vypsány v tabulce 13 a malé průměry radiálních ložisek jsou shodné s malými průměry těch axiálních.

#### 5.1.8. Lineární vedení

Jako lineární vedení je zvoleno kladkové řešení, které využívá ocelové vodící tyče zasazené v hliníkových držácích uložených v drážkách profilů. Toto řešení nepřenáší sílu od teplotní dilatace tyče vedení na rám. Nemělo by tak docházet k deformaci rámu při změnách teplot.

Pro výpočet zatížení je nutné zohlednit pozici tištěného dílu na podložce a umístění vedení. V závislosti na rozložení sil jsou různě namáhána ložiska kladek vedení.  $F_c$  je brána jako síla působící od tištěného dílu zabírajícího 50 % tiskového prostoru o výšce 1 m k dané tiskové ploše. Síla  $F$  reprezentuje zatížení od tištěného dílu umístěného na kraji tiskové desky. Vzdálenost  $e$  značí pozici síly  $F$  vůči působišti síly  $F_{lc}$  a symbolizuje vzdálenost, která činí 75 % délky poloviny tiskové plochy, od toho je odečtena polovina šířky vedení.

*Tabulka 15 Vlastnosti ložisek kladek Alutec KK [35]*

801235	D [mm]	C [N]	8300	Vstřední [m/min]	0,0025
	35	$C_0$ [N]	5000		

$$F = \frac{F_c}{3} \quad (17)$$

$$e = \frac{A}{2} \cdot 0,75 - \frac{b_{vedení}}{2} \quad (18)$$

$$M_k = F \cdot e \quad (19)$$

$$F_u = \frac{M_k}{30} \quad (20)$$

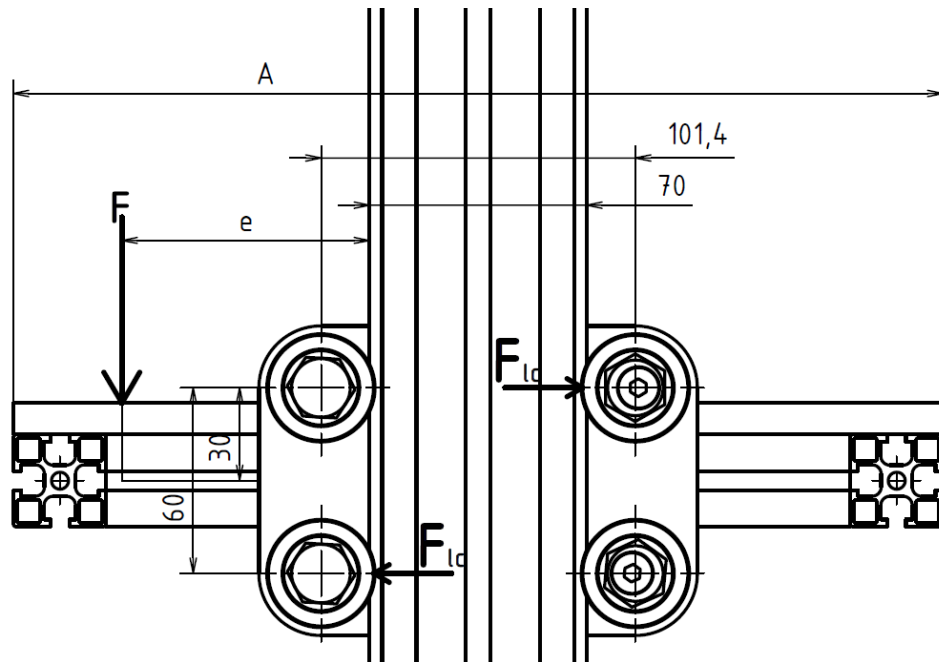
$$F_{lc} = \frac{F_u}{2} + 0,02 \cdot C \quad (21)$$

$$L_h = \left( \frac{C}{F_{lc}} \right)^3 \cdot \frac{1666}{v_{střední}} \quad (22)$$

Součástí výpočtu  $F_{lc}$  dle vzorce číslo 21 je také síla vyvozená předpětím. Výpočet životnosti ložisek, tedy vzorec číslo 22 je použit vzorec z katalogu Item Haberkorn. Vzorec číslo 22, tedy počítá životnost na základě zatížení a posuvové rychlosti. [33]

Tabulka 16 Vozík 1

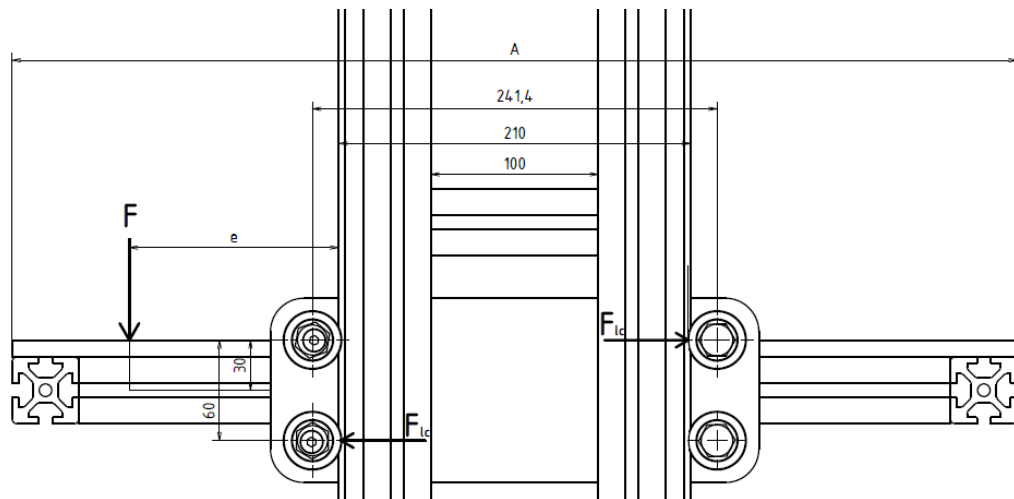
F <sub>c</sub> [N]	F [N]	A [mm]	e [mm]	M <sub>k</sub> [Nmm]	[mm]	F <sub>u</sub> [N]	F <sub>lc</sub> [N]	L <sub>h</sub> [hod]
142,25	46,94	200	40	1 877,63	30	62,59	197,29	49 616 747 539
317,60	104,81	300	77,5	8 122,59	30	270,75	301,38	13 920 064 658
561,62	185,34	400	115	21 313,57	30	710,45	521,23	2 690 856 102



Obrázek 39 Vozík 1

Tabulka 17 Vozík 2

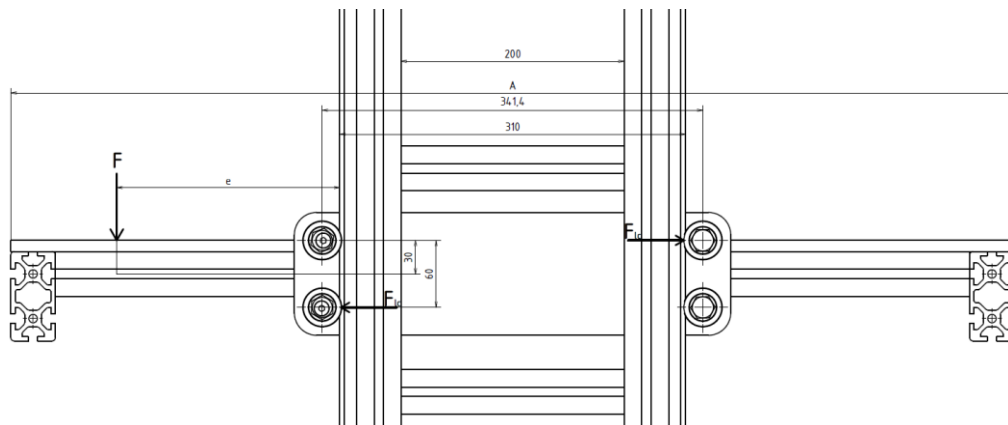
F <sub>c</sub> [N]	F [N]	A [mm]	e [mm]	M <sub>k</sub> [Nmm]	[mm]	F <sub>u</sub> [N]	F <sub>lc</sub> [N]	L <sub>h</sub> [hod]
892,46	294,51	500	82,5	24 297,35	30	809,91	570,96	2 047 206 327
1 277,75	421,66	600	120	50 599,00	30	1 686,63	1 009,32	370 584 246
1 747,41	576,64	700	157,5	90 821,44	30	3 027,38	1 679,69	80 404 682



Obrázek 40 Vozík 2

Tabulka 18 Vozík 3

$F_c$ [N]	$F$ [N]	$A$ [mm]	$e$ [mm]	$M_k$ [Nmm]	[mm]	$F_u$ [N]	$F_{lc}$ [N]	$L_h$ [hod]
2 271,02	749,43	800	145	108 668,07	30	3 622,27	1 977,13	49 301 558
2 865,75	945,70	900	182,5	172 589,57	30	5 752,99	3 042,49	13 529 464
3 507,08	1 157,33	1000	220	254 613,65	30	8 487,12	4 409,56	4 444 094



Obrázek 41 Vozík 3

Vzhledem k odhadovanému rozložení tištěného dílu a síle, která díky tomu působí na ložiska kladek vedení a nízké rychlosti posuvu tiskové podložky vychází životnost ložisek velmi vysoká.

## 5.2. Návrh XY

Pro pohyb tiskové hlavy je potřeba počítat zejména s dynamickými silami vznikajícími prudkou změnou rychlosti v průběhu tisku. Tyto změny jsou patrné hlavně v přechodu rychloposuvu do pracovního tiskového posuvu. Na tyto síly je třeba dimenzovat pohonnou soustavu.

### 5.2.1. Předpokládané rychlosti

Jako maximální rychlost tisku pro výpočty potřebných řemenů volím 500 mm/s, reálné tiskové rychlosti se následně budou pohybovat v rozmezí 50 až 250 mm/s. Zrychlení tiskové hlavy voleno pro účely výpočtů 1250 mm/s<sup>2</sup>.

### 5.2.2. Návrh řemenového převodu

Pro výpočty sil v řemenovém převodu byla využita online kalkulačka výrobce ozubených řemenů ContiTech. Voleny jsou řemeny z řady Synchrodrive, které jsou dodávány v metrži a jsou určeny k pohonu různých posuvových zařízení. K výpočtu byl využit online kalkulátor na stránkách výrobce řemenů ContiTech. [48]

*Tabulka 19 Síly působící na řemen pohonu tiskové hlavy [48]*

Hmotnost tiskové hlavy $m_h$ [kg]	Osová vzdálenost $a$ [mm]	Délka řemene $L$ [mm]	Napínací síla $F_v$ [N/Tr.]	Celková napínací síla $F_{vc}$ [N]	Síla při rozběhu $F_{anf}$ [N]	Brzdná síla $F_{brems}$ [N]	Prodloužení $\Delta L_f$ [mm/m/N]
1	280	650	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	380	850	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	480	1050	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	580	1250	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	680	1450	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	780	1650	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	880	1850	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	980	2050	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246
1	1080	2250	2,5	7,5	2,43	2,5	0,0246

Řemenový převod pro pohon tiskové hlavy využívá řemen ContiTech Synchrodrive typu HTD 5M HP o šířce 10 mm. Jsou využity řemenice Tyma s 16 zuby typu 16-5M-15. Roztečný průměr řemenice je 25,46 mm a šířka věnce 15 mm. Hmotnost tiskové hlavy byla odhadnuta na 1 kg vzhledem k hmotnosti hotendu 0,3 kg a dalším částem. [49]

*Tabulka 20 Síly působící na řemen pohonu portálu [48]*

Hmotnost portálu $m_p$ [kg]	Osová vzdálenost $a$ [mm]	Délka řemene $L$ [mm]	Napínací síla $F_v$ [N/Tr.]	Celková napínací síla $F_{vc}$ [N]	Síla při rozběhu $F_{anf}$ [N]	Brzdná síla $F_{brems}$ [N]	Prodloužení $\Delta L_f$ [mm/m/N]
2,0	350	850	5	15	4,85	5	0,012307
2,2	450	1050	5,5	16,5	5,34	5,5	0,012307
2,4	550	1250	6	18	5,83	6	0,012307
3,7	650	1450	9,25	27,75	8,98	9,25	0,012307
4,1	750	1650	10,25	30,75	9,95	10,25	0,012307
4,5	850	1850	11,25	33,75	10,92	11,25	0,012307
4,9	950	2050	12,25	36,75	11,89	12,25	0,012307
5,2	1050	2250	13	39	12,62	13	0,012307
5,6	1150	2450	14	42	13,59	14	0,012307

Řemenový převod pro pohon portálu využívá dvojice řemenů ContiTech Synchrodrive typu HTD 5M HP o šířce 10 mm. Jsou využity řemenice Tyma se 16 zuby typu 16-5M-15. Roztečný průměr řemenice je 25,46 mm a šířka věnce 15 mm. Hmotnost portálu je uvažována jako hmotnost nosníku, vedení a dalších nutných dílů s připočtenou tiskovou hlavou. [49]

### 5.2.3. Volba krokových motorů

Krokové motory jsou voleny, aby zajistily přesné nastavení polohy portálu a tiskové hlavy a měly dostatečný výkon pro pohyb tiskovým ústrojím. V následující tabulce jsou vypsány parametry motorů a potřebné momenty pro pohyb tiskárny.

Tabulka 21 Parametry motorů pro pohon tiskové hlavy a portálu [50] [51]

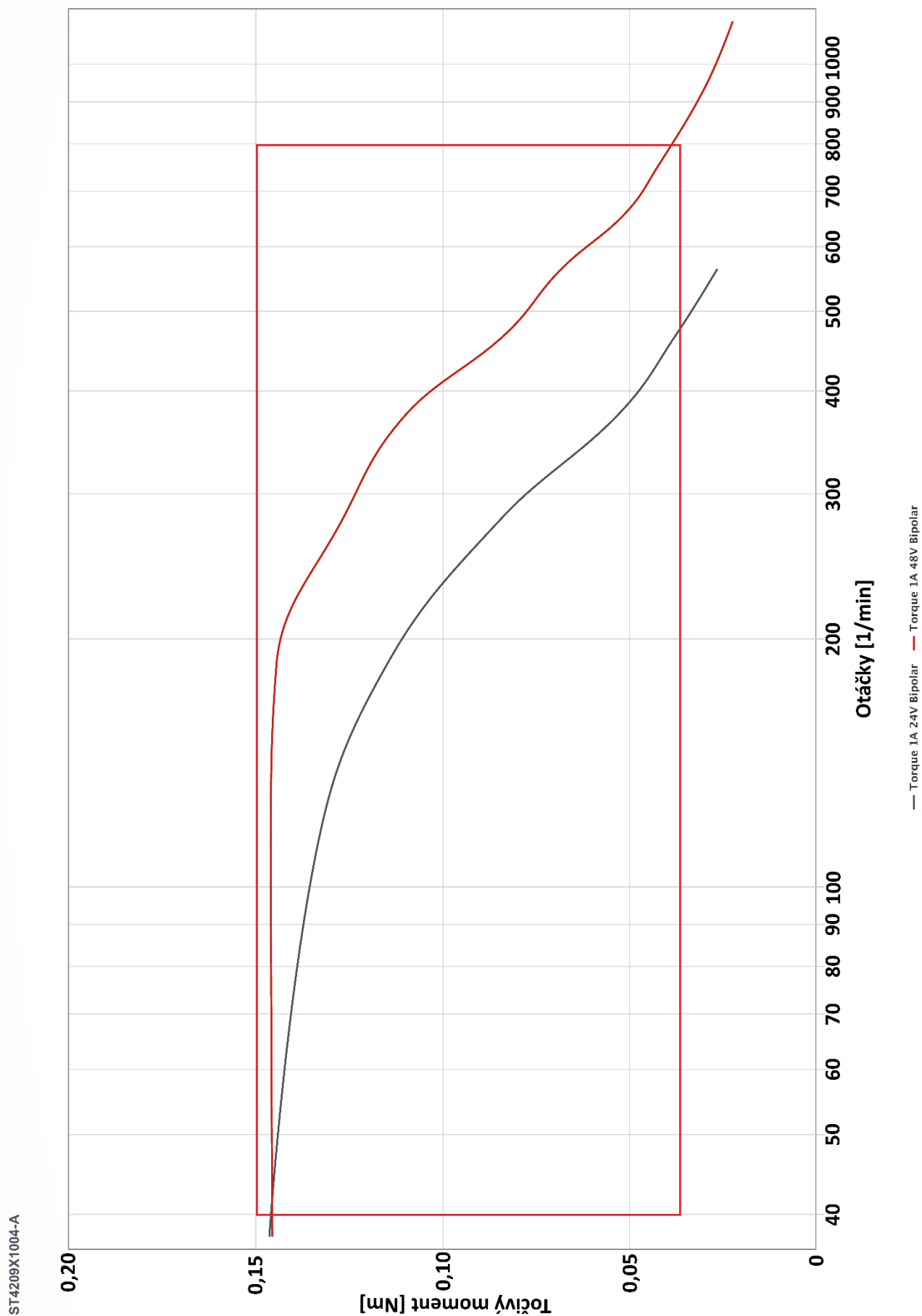
Typové označení	NEMA	Přidržovací moment [Nmm]	Potřebný brzdny moment [Nmm]	Napájecí napětí [V]	Délka kroku [°]	Rozlišení kroků [-]	Hřídel [mm]	Cena za 1 kus [€]	Rozlišení kroku na řemenici [mm]
ST4209X1004-A	17	170	31	24/48	0,9	$\frac{1}{32}$	Ø5x24	34,8	0,007
ST4209M1206-B	17	353,6	173	24/48	0,9	$\frac{1}{32}$	Ø5x24	26,9	0,007

Pro získání potřebné přesnosti bylo nutné využít děliče kroků, ten umožňuje přesnější nastavení pozice krokového motoru. Každý krok je v tomto případě rozdělen na dalších 32 dílků. Toto řešení bylo využito z důvodu omezení minimální velikosti řemenice na 16 zubů pro zvolený typ řemene. [52]

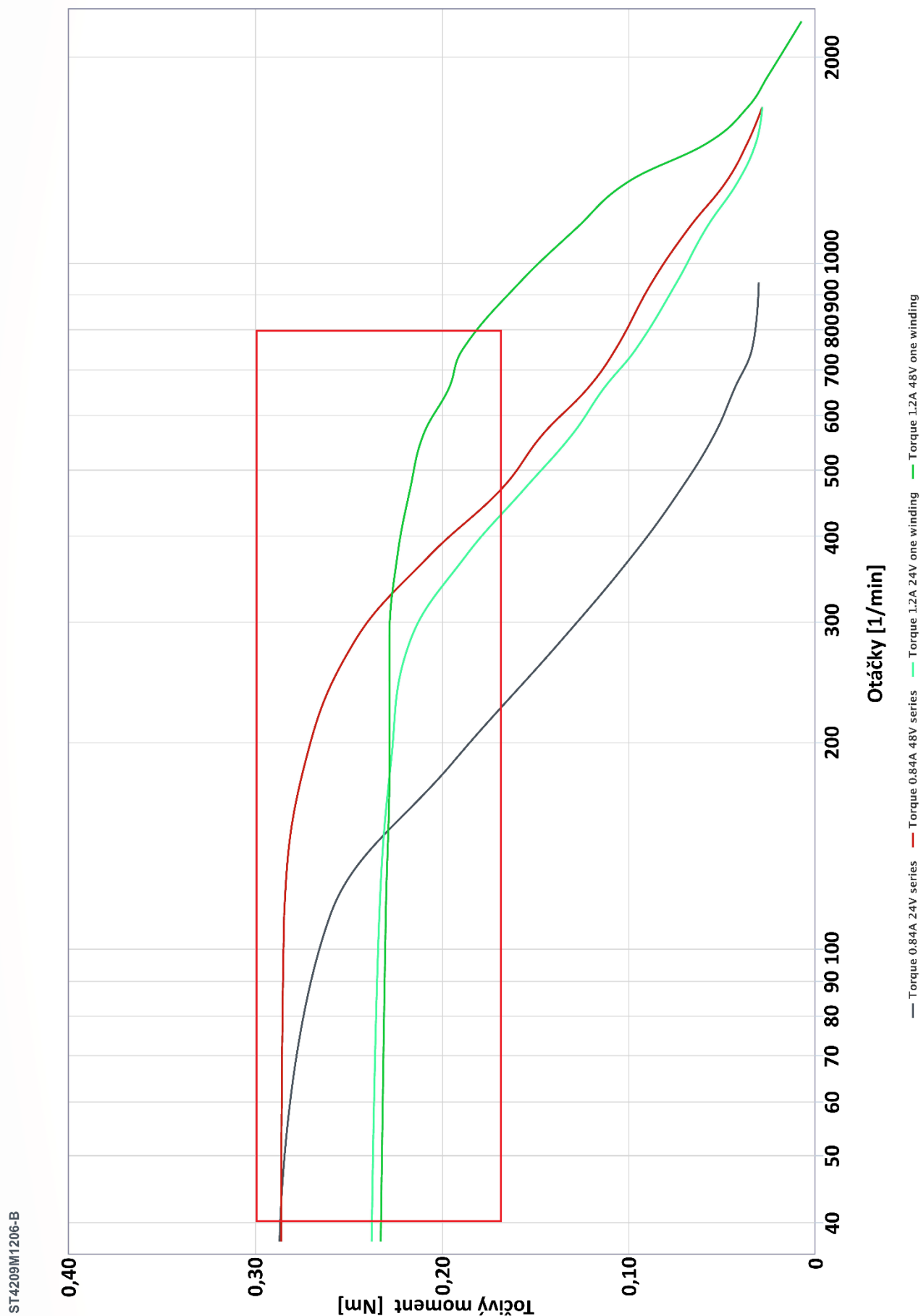
Moment potřebný pro pohon tiskové hlavy je vypočten pro rozběhovou sílu a roztečný průměr řemenice 25,46 mm. Moment pro pohon portálu je vypočten ze síly potřebné k pohonu portálu největší tiskárny, tedy té s tiskovou plochou 1 m<sup>2</sup>.

$$M_{křh} = F_{anf} \cdot \frac{D_p}{2} = 2,43 \cdot \frac{25,46}{2} = 30,93 \text{ Nmm} \quad (23)$$

$$M_{křp} = F_{anf} \cdot \frac{D_p}{2} = 13,59 \cdot \frac{25,46}{2} = 173 \text{ Nmm} \quad (24)$$



Obrázek 42 Průběh momentu motoru tiskové hlavy ST4209X1004-A [50]



Obrázek 43 Průběh momentu motoru portálu ST4209M1206-B [51]



Předpokládané maximální otáčky pro pojezdy v rovině XY jsou 800 ot/min. V těchto otáčkách bude dosahovat tisková hlava a portál rychlosti lehce přesahující 1000 mm/s.



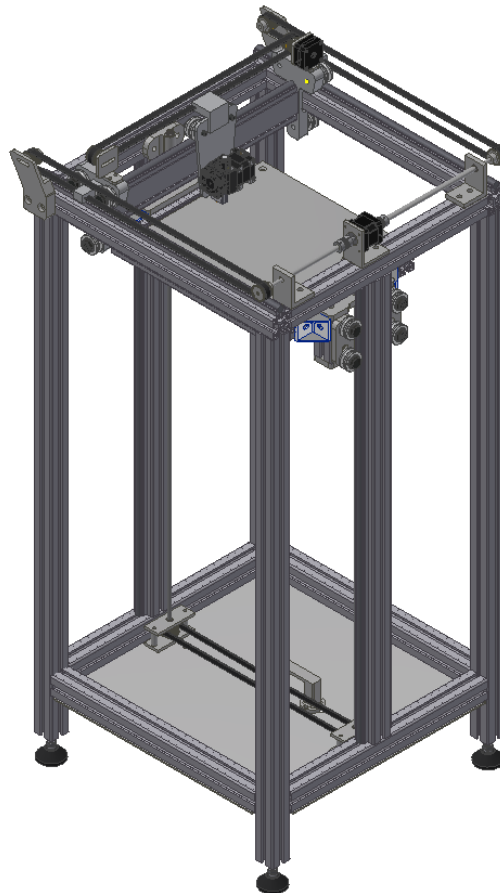
## 6. Konstrukce

Rám sestavený z hliníkových profilů využívá spojovacích prvků systému hliníkových profilů. Další díly jsou rovněž hliníkové či z ocelového plechu. Využití extrudovaných hliníkových profilů zjednodušuje změny rozměrů konstrukce.

V rámci bakalářské práce jsou zpracovány dva koncepční modely, „malá tiskárna“, v tomto případě tiskárna o tiskovém prostoru 300 x 300 x 700 mm a „velká tiskárna“, v tomto případě tiskárna s tiskovým prostorem o velikosti 900 x 900 x 700 mm.

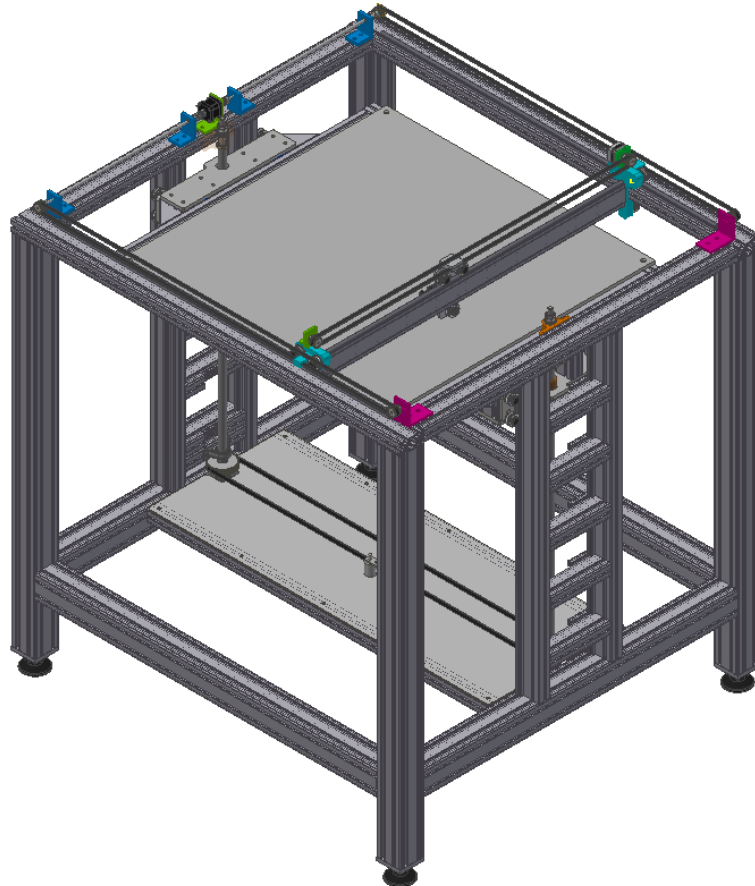
### 6.1. Rám

Rám tiskáren je rozdělen do 3 skupin, podle nich se mění velikost profilů rámu a rozložení vedení tiskové desky. Pro rámy jsou využity profily Alutec KK modulu 40. Pro tiskárny do rozměru tiskové podložky 400 x 400 mm jsou využity profily o rozměru 40 x 40 mm. Tiskárny do rozměru tiskové desky využívají rám z profilů převážně o rozměru 40 x 80 mm. Tiskárny o rozměru podložky do 1000 x 1000 mm mají rám složený z profilů zejména o rozměru 80 x 80 mm.



Obrázek 44 Rám „malé tiskárny“

Varianta „malé tiskárny“ využívá rámu kompletně sestaveného z profilů 40 x 40 mm s drážkou pro šrouby M8. Portál je z profilu 45 x 18,5 mm, pojezd portálu zajišťuje trojice kladek, dvě horní kladky jsou pevné a spodní je umístěna na excentrickém šroubu. Kladky jsou tedy rozmístěny do trojúhelníku, řešení bylo zvoleno pro maximalizaci možného pojezdu portálu, vzhledem k uzavřené konstrukci rámu.



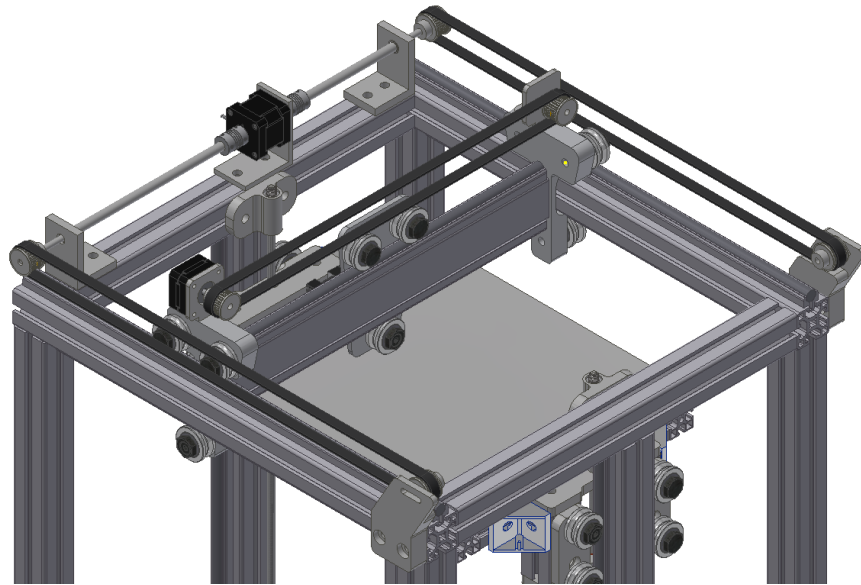
*Obrázek 45 Rám „velké tiskárny“*

Rám „velké tiskárny“ je složen z profilů 80 x 80 a 40 x 80 mm. Vedení osy Z je složeno ze dvou profilů 40 x 80 mm ve vzdálenosti 200 mm, aby se zabránilo prohýbání těchto profilů od předpětí kladek vedení. Větší rozteč kladek byla zvolena pro snížení klopných sil, které mohou na vedení působit od asymetrických tištěnců nebo tištěných dílů umístěných excentricky na tiskové ploše. Portál je také z profilu 45 x 18,5 mm jako u „malé tiskárny“, shodná je také většina dílů pohonu portálu a tiskové hlavy.

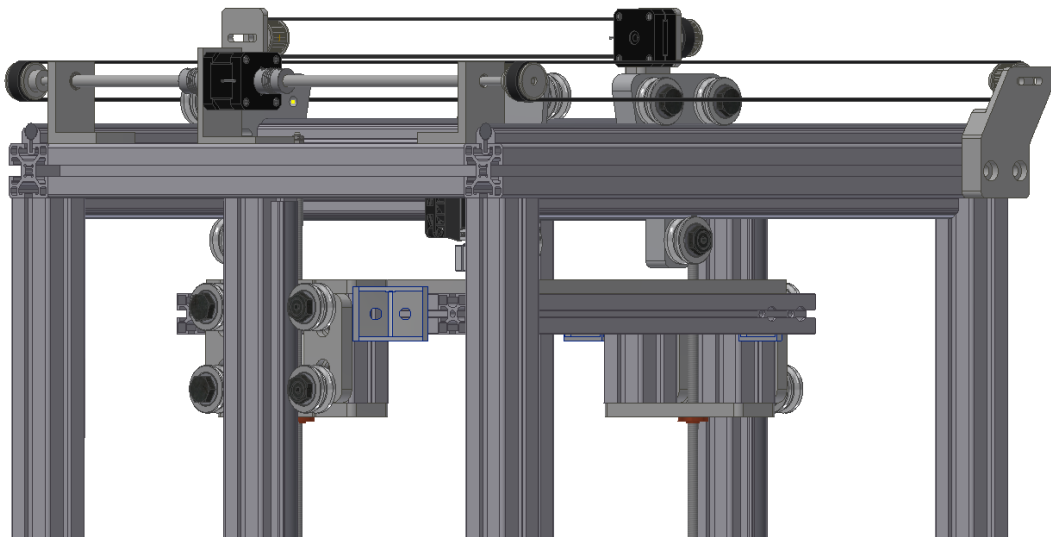
## **6.2. Rozvržení tiskárny**

Tiskárna využívá portálu pro pojezd tiskové hlavy, toto řešení bylo zvoleno pro větší tuhost konstrukce a také je vhodné pro velké rozpony. Portál je poháněn ozubeným řemenem z obou stran. Oba řemeny jsou poháněny jedním motorem, se kterým jsou

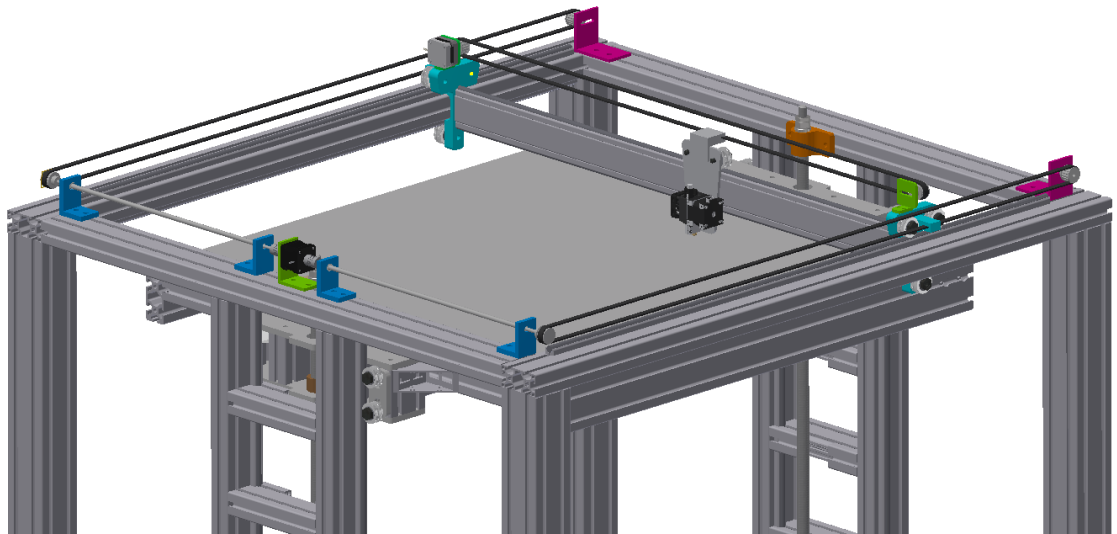
spojeny hřídelemi. Tisková hlava, která je umístěna na portálu, je poháněna krokovým motorem umístěným na portálu pomocí ozubeného řemene. Řemeny pohonu portálu a tiskové hlavy jsou napínány pomocí posuvné řemenice.



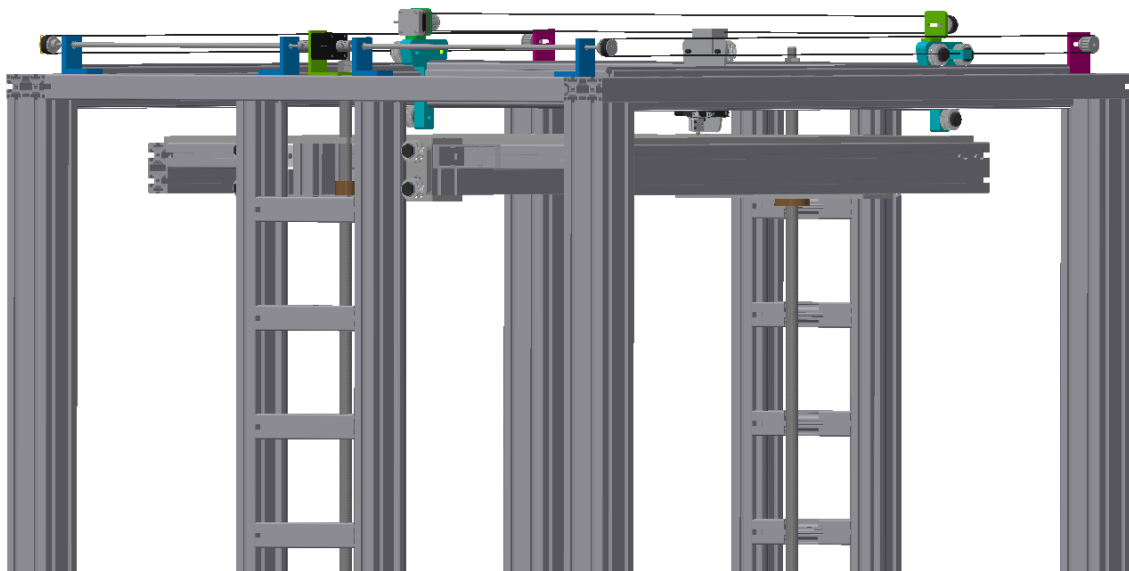
*Obrázek 46 Rozložení XY „malé tiskárny“*



*Obrázek 47 Osa Z „malá tiskárna“*

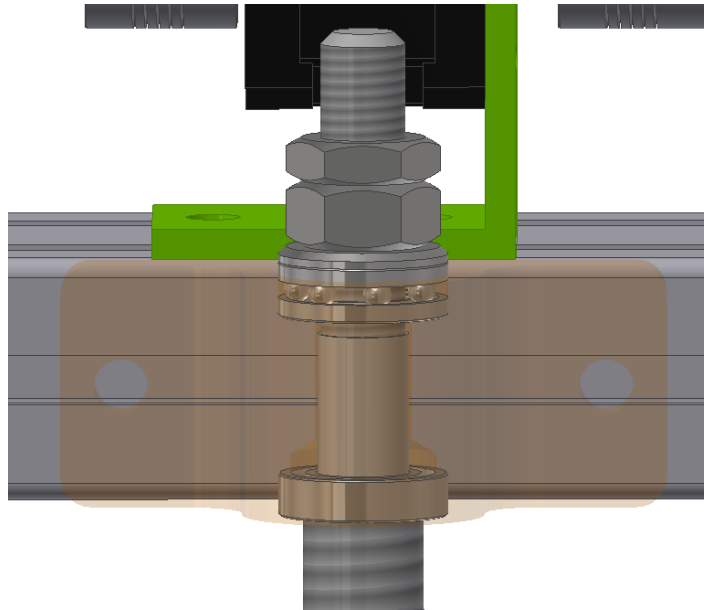


*Obrázek 48 Rozložení XY „velké tiskárny“*



*Obrázek 49 Osa Z „velká tiskárna“*

Pro pohon tiskové desky jsou využity dva pohybové šrouby, které jsou poháněny jedním krokovým motorem a spřaženy ozubeným řemenem s napínáním ramenem. Pohybové šrouby jsou uchyceny v horní části rámu kombinací axiálního a radiálního ložiska. V dolní části jsou uloženy pomocí dvou radiálních ložisek, toto řešení zabraňuje ohýbání pohybového šroubu od předpětí a tažné síly na řemenu.

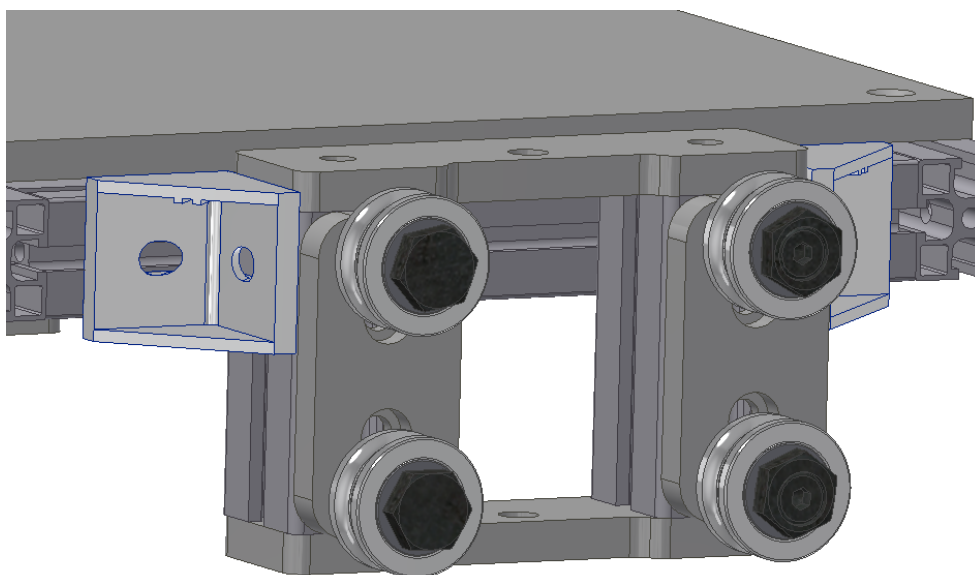


*Obrázek 50 Uložení pohybového šroubu*

Ložiska uložení šroubů jsou uchycena v ložiskovém domku, který je uchycen k horní části rámu. Axiálně jsou pohybové šrouby zajištěny pomocí dvou matic. Toto uchycení umožňuje nastavení pozice šroubu.

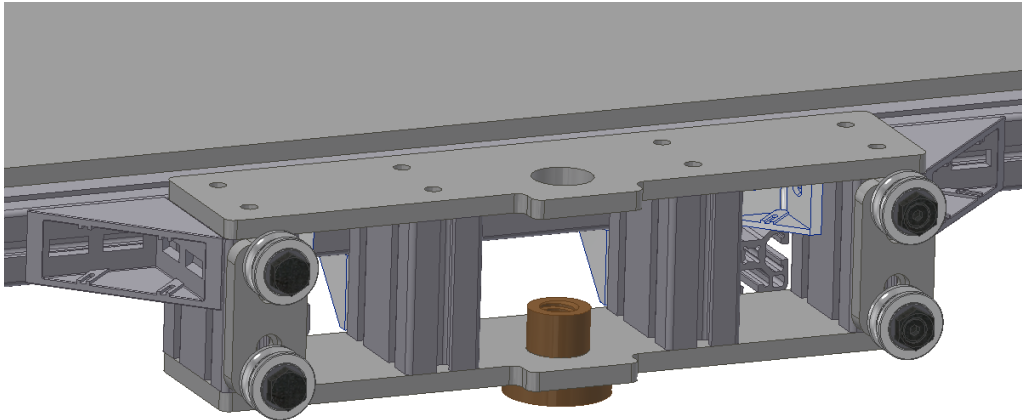
### **6.3. Vozík tiskové podložky**

Vozík tiskové podložky je veden pomocí kladkového vedení, které jezdí po tyčích o průměru 12 mm. Vozík je složen z extrudovaných profilů, které jsou spojeny pomocí úhelníků. Součástí vozíku je také přírbová bronzová matice pohybového šroubu. Kladky jsou přišroubovány na hliníkovém mezikuse, který je přišroubován k profilu.



*Obrázek 51 Vozík tiskové desky „malé tiskárny“*

Profily spolu s deskami tvoří uzavřenou konstrukci kladkového pojezdu. K rámu tiskové podložky je rám vedení uchycen pomocí úhelníků. Matice je přírubová a uchycena pomocí 4 šroubů.



*Obrázek 52 Vozík tiskové desky „velké tiskárny“*

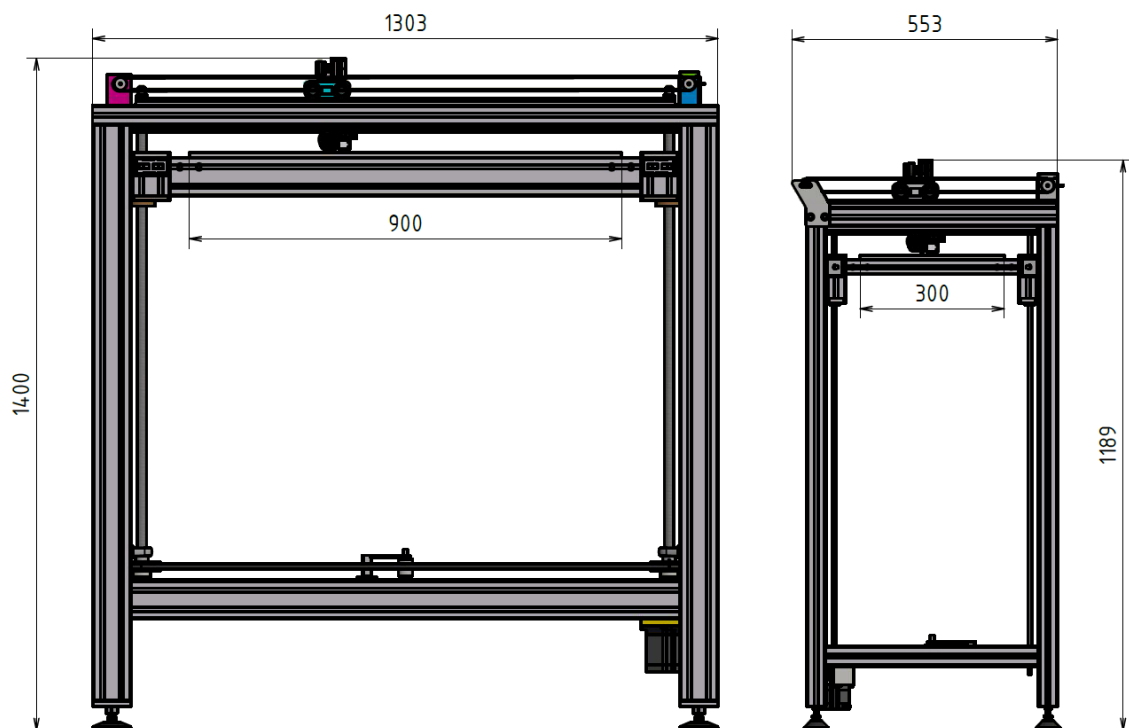
U této varianty byly přidány profily pro zvýšení tuhosti, průhyb desky s maticí pohybového šroubu by snižoval přesnost tisku. Profily byly přidány vzhledem k šířce kladkového vedení. Profily s kladkami jsou vyztuženy úhelníky, aby byla kompenzována přítlačná síla kladek na vedení.

## 7. Závěr

Závěrem je nutno zhodnotit optimální koncepční řešení dané tiskárny a navrhnout konstrukci tak, aby zaručovala kvalitu tisku, byla dobře servisovatelná, měla potřebnou životnost, a to vše v přiměřené ceně.

Pro samotný typ tiskárny volím klasickou kartézskou koncepci. Umožňuje velké využití zastavěného prostoru a je velmi jednoduché měnit rozměry do libovolného směru. Tiskárnu jsem koncipoval s pojezdem tiskové hlavy v osách XY a tisková deska je posouvána pouze v ose Z. Hmotnost a pozice tištěného dílu tak nemá vliv na dynamické vlastnosti tiskárny.

Extruder s přímým podáváním materiálu je vhodný pro tisk flexibilních materiálu. Extruder a hotend volím jako jeden celek pro jednotryskové provedení i pro dvoutryskové řešení. V rámci práce jsem použil komplet extruderu s hotendem 3ED Hemera, heatblock byl použit Vulcano s tryskou o průměru 0,4 mm.



*Obrázek 53 Srovnání tiskáren*

Na obrázku 53 jsou zobrazeny obě modelované tiskárny. Toto zobrazení jsem zvolil pro přímé porovnání velikosti mezi koncepčně navrženými řešeními. Obě varianty využívají shodné sestavy hotendu.

Rámy jsou složeny z profilů Alutec KK s modulem 40, jedná se o kombinaci profilů 40 x 40 mm, 40 x 80 mm a 80 x 80 mm. Průřez profilů závisí na velikosti tiskové plochy. Rozměry profilů rámu jsou odstupňovány dle velikosti pohybového šroubu do tří skupin.

První využívá rám sestavený z profilů 40 x 40 mm, druhý využívá kombinace profilů 40 x 40 a 40 x 80 mm a třetí je sestaven z profilů 80 x 80 a 40 x 80 mm. Modul profilů 40 byl volen pro potřeby uložení držáků tyčí vedení, držáky jsou navrženy pro drážky na šrouby M8.

Mimo extrudované profily je rám sestaven z tvarově jednoduchých dílů, které mezi sebou jednotlivé tiskárny sdílí. Stejné komponenty jsou použity pro vozík hotendu, vozík portálu a pro uložení motorů a řemenic. Tyto díly jsou vyráběny z hliníkových desek a L profilů.

Pro vedení jsou využity kladková kola a tyče uložené v držácích ve drážkách profilů, toto řešení nepřenáší do rámu síly od teplotní roztažnosti ocelové tyče vedení. Pro vozík tiskové desky je využito 4 kladek na dvou protilehlých stranách tiskové desky. Portál je veden 3 kladkami na vozících z obou stran portálu. Pro vedení hotendu je také využit vozík se 3 kladkami. U 4 kladkového řešení jsou 2 kladky pevné a 2 na excentru pro nastavení předpětí, u 3 kladek je 1 na excentrickém šroubu.

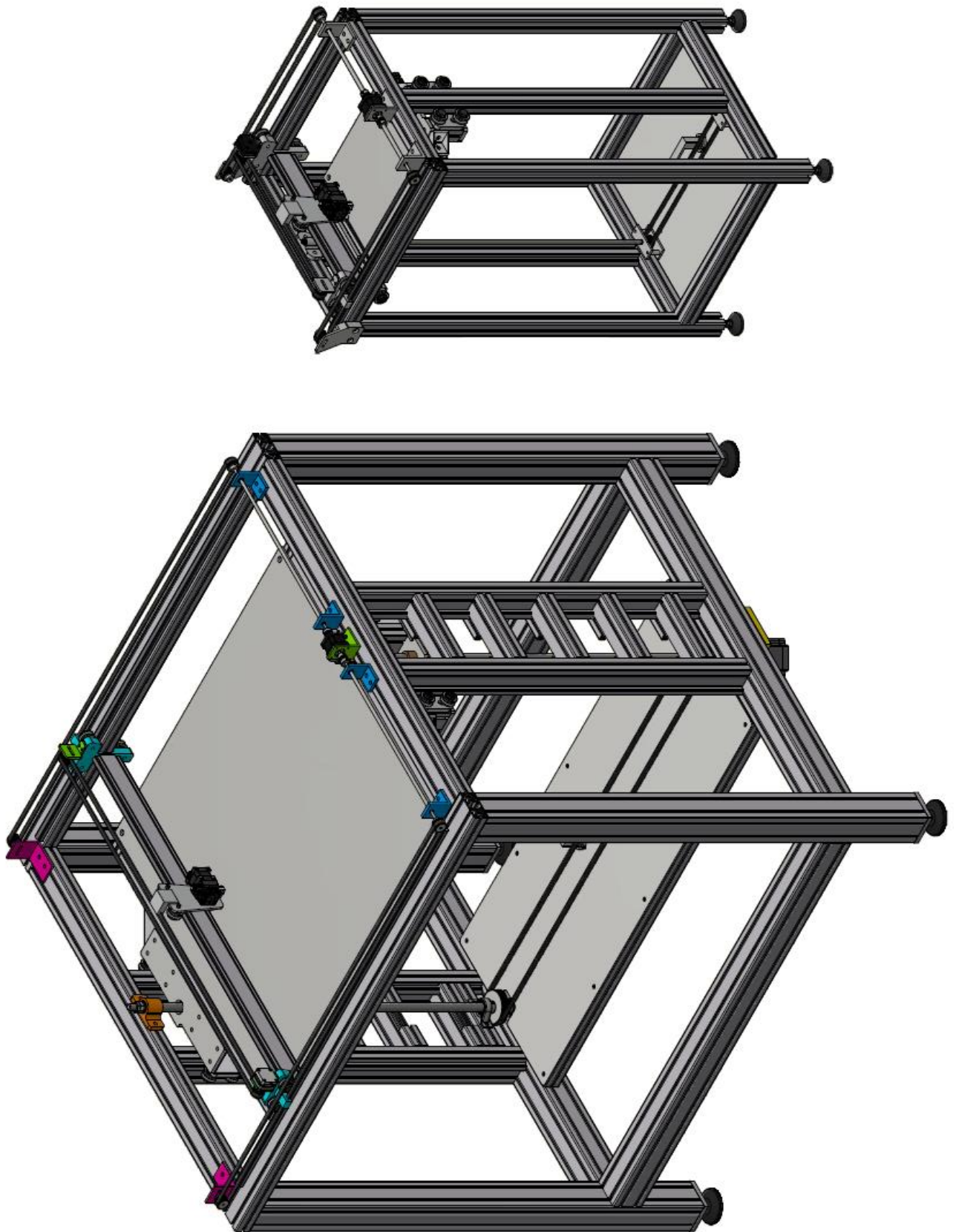
Pohon portálu a hotendu zajišťují krokové motory pomocí ozubeného řemene. Tisková deska je poháněna dvojicí pohybových šroubů spřažených převodem s ozubeným řemenem s převodem 1:1, motor je přes pružnou spojku připojen k jednomu ze šroubů. Šrouby jsou uloženy v ložiskových domcích v horní části rámu, jejich pohon se nachází v dolní části rámu.

Tabulka 22 zobrazuje možné velikostní varianty tiskáren. Velikost tiskové podložky je v řadě odstupňovaná po 100 mm v rozsahu od 200 do 1000 mm a shodně je odstupňována také výška tiskového prostoru. Ta je v rozsahu 200 až 1000 mm.

*Tabulka 22 Rozměrová řada tiskáren*

Velikost tiskové plochy	Výška tiskového prostoru								
	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	h <sub>5</sub>	h <sub>6</sub>	h <sub>7</sub>	h <sub>8</sub>	h <sub>9</sub>
200x200	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
300x300	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
400x400	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
500x500	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
600x600	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
700x700	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
800x800	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
900x900	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1000x1000	200	300	400	500	600	700	800	900	1000





Obrázek 54 Porovnání ve 3D pohledu

## Použitá literatura

- [1] PRŮŠA, Josef a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. První vydání. Praha: Průša Research a.s., 2019 [cit. 2021-06-01].
- [2] CHUA, Chee a Kah LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition. Singapore: Scientific Publishing Co. Pte, 2014. ISBN 9789814571401.
- [3] 3D printing. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/>
- [4] FLYNT, Joseph. History of 3D Printing Timeline: Who Invented 3D Printing. *3D insider* [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-history/>
- [5] SNIKHOVSKA, Kseniia. The different types of 3D printing technology. *Penand Plastic* [online]. 2020 [cit. 2020-12-23]. Dostupné z: <https://penandplastic.com/3d-printer-types/>
- [6] WALLACH KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. První vydání. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 9788025148761.
- [7] Přehled technologií 3D tisku. *Dk metal prominent s.r.o* [online]. 2018 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku>
- [8] HOMOLA, Jan. Trendy ve 3D tisku směřují ke snižování cen a rozšiřování nabídky dostupných materiálů. *3D tisk* [online]. 2018 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/trendy-ve-3d-tisku-smeruji-ke-snizovani-cen-a-rozsirovani-nabidky-dostupnych-materialu/>
- [9] 3D tiskárny: Kompletní průvodce. *Futlab* [online]. 2017 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://futlab.cc/vyber-3d-tiskarny/>
- [10] Linear Rail. *OpenBuilds partstore* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://openbuildspartstore.com/linear-rail>
- [11] File:PCB HEATBED.jpg. In: *Rep Rap* [online]. 2010 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: [https://reprap.org/wiki/File:PCB\\_HEATBED.jpg](https://reprap.org/wiki/File:PCB_HEATBED.jpg)
- [12] Creality 3D® Nová vylepšená celokovová mačkaná vytlačovací souprava Bowden pro Ender-3/Ender-3 Pro/Ender-3 V2/CR-10 Pro V2 3D tiskárna. *Banggood* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: [https://www.banggood.com/cs/Creality-3D-New-Upgraded-All-Metal-Red-Block-Bowden-Extruder-Kit-for-Ender-3-or-Ender-3-Pro-or-Ender-3-V2-or-CR-10-Pro-V2-3D-Printer-p-1689634.html?utm\\_source=googleshopping&utm\\_medium=cpc\\_organic&gmcCountry=CZ&utm\\_content=minh](https://www.banggood.com/cs/Creality-3D-New-Upgraded-All-Metal-Red-Block-Bowden-Extruder-Kit-for-Ender-3-or-Ender-3-Pro-or-Ender-3-V2-or-CR-10-Pro-V2-3D-Printer-p-1689634.html?utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_organic&gmcCountry=CZ&utm_content=minh)
- [13] Reprapdiscount, Hexagon Full Metal Hot End, Hotend, 3mm.4mm Nozzle: Industrial & Scientific. *Amazon* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z:

<https://www.amazon.com/Reprapdiscount-Hexagon-Hotend-3mm-4mm-Nozzle/dp/B00MNUFIGG>

- [14] CNC Bipolar Nema 17 Stepper motor, 2.1V 2.1A, 2 phase 4 wires. *ATO* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.ato.com/4-wire-bipolar-nema-17-stepper-motor-2-1v-2-1a-1-8-degree-2-phase>
- [15] Typy 3D tiskáren. *Makerslab* [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
- [16] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+. *PRUSA RESEARCH* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html#>
- [17] He3D K200 Delta 3D Printer Kit. *3D Printers Online Store* [online]. [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.3dprintersonlinestore.com/delta-3d-printer-kit>
- [18] BONDUS. Five bar parallel Scara. *Duet 3D* [online]. 2019 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://forum.duet3d.com/topic/11127/five-bar-parallel-scara>
- [19] O'CONNELL, Jackson. Belt 3D Printer: All You Need to Know. *All3DP* [online]. 2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-belt-all-you-need-to-know/>
- [20] Titan Aero 1,75mm 12V. *Vše pro 3D tisk* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/p/titan-aero-1-75mm-12v#>
- [21] Hemera Direct Kit - 1.75mm. *3D Jake* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: [https://www.3djake.cz/e3d/hemera-direct-kit-175mm?sai=7326&gclid=CjwKCAiAm-2BBhANEiwAe7eyFJZuzboAKRBI7pyltsHaFDR9CR\\_l3gDQgQ-HFr0pHTznayyznwulRRoC8UoQAvD\\_BwE](https://www.3djake.cz/e3d/hemera-direct-kit-175mm?sai=7326&gclid=CjwKCAiAm-2BBhANEiwAe7eyFJZuzboAKRBI7pyltsHaFDR9CR_l3gDQgQ-HFr0pHTznayyznwulRRoC8UoQAvD_BwE)
- [22] BMG extruder. *Na3D* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/p/2698/bmg-extruder>
- [23] BMG Extruder. *Majkl3D* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://majkl3d.cz/extruder-c3/bmg-extruder-i103/>
- [24] Bulldog extruder. *Vše pro 3D tisk* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/p/bulldog-extruder-1>
- [25] Kovový extruder - levý. *Vše pro 3D tisk* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/p/kovovy-extruder>
- [26] LE BOUTHILLIER, Jean. Heat Beds in 3D Printing – Advantages and Equipment. *Boots Industries* [online]. 2016 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <http://bootsindustries.com/heat-bed-3d-printing/>
- [27] Polyimide Thermofoil Heaters. *Hotlong* [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://en.hl-js.com/polyimide-thermofoil-heaters3.html>

- [28] Polyimide (Kapton) Heater. *Sinomas* [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.flexheaters.com/polyimide-kapton-heater>
- [29] Silicone Rubber Heater for 3D Printer Heated Bed. *Hotlong* [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://en.hl-js.com/silicone-rubber-heater-for-3d-printer-heated-bed.html>
- [30] Silicone Rubber Heater. *Sinomas* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.flexheaters.com/silicone-rubber-heater#specification>
- [31] Basic mechanic elements. *Bosch Rexroth* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/produkty/skupiny-produktu/montazni-technika/basic-mechanic-elements>
- [32] Lineární technika. *Bosch Rexroth* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/produkty/skupiny-produktu/linearni-technika/index>
- [33] Stavebnicový systém MB 9 - CZ. *Item Haberkorn* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: [https://www.haberkorn.cz/data/uploads/Download/Katalog/ss-item-mb\\_9/book\\_cz/index.html#543](https://www.haberkorn.cz/data/uploads/Download/Katalog/ss-item-mb_9/book_cz/index.html#543)
- [34] Hliníkový konstrukční systém a příslušenství. *Alutec KK* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.aluteckk.cz/hlinikovy-konstrukcni-system>
- [35] Lineární vedení ALUTEC KK. *Alutec KK* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.aluteckk.cz/linearni-vedeni>
- [36] Linear Actuators. *OpenBuilds partstore* [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://openbuildspartstore.com/linear-actuators/>
- [37] Katalog Alutec K&K - Výpočet nosníku. *Alutec KK* [online]. [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://katalogaluteckk.aspone.cz/Beam#>
- [38] Trapézový šroub D8/2/T8, 1000 mm, D82T81000. *Levné 3D tiskárny* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.levne3dtiskarny.cz/cs/zavitove-tyce-a-matice/271-trapezovy-sroub-d82t8-1000-mm-d82t81000.html>
- [39] TR trapézové válcované šrouby. *CNC shop* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/trapezove-valcovane-srouby-tr1604>
- [40] Trapézová matice T8x8. *Užitečnosti* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: [https://www.uzitecnosti.cz/Trapezova-matice-T8x8-d364.htm?gclid=CjwKCAjwpKCDBhBPEiwAFgBzjwn\\_AX9vQcfCUMaxUCWhn3ucJX1kPxVDicEj3z0qDCOSzlo8Ts94HBoCgykQAvD\\_BwE#detail-anchor-description](https://www.uzitecnosti.cz/Trapezova-matice-T8x8-d364.htm?gclid=CjwKCAjwpKCDBhBPEiwAFgBzjwn_AX9vQcfCUMaxUCWhn3ucJX1kPxVDicEj3z0qDCOSzlo8Ts94HBoCgykQAvD_BwE#detail-anchor-description)
- [41] Trapezoidal flanged machined nuts BFM of bronze CC493K (CuSn7ZnPb) according to ISO 2901/2903 and DIN 103 tolerance 7H. *CNC shop* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: [http://www.cncshop.cz/PDF/TR/bfm\\_en.pdf](http://www.cncshop.cz/PDF/TR/bfm_en.pdf)
- [42] CONTI® SYNCHRODRIVE. *Tyma* [online]. 2020 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/pdf/contitech-conti-synchrodrive.pdf>

- [43] Ozubené řemenice s válcovou dírou (bez díry). *Tyma* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/pdf/htd-5m-standard-timing-pulleys.pdf>
- [44] ST6018M2008-A – Stepper motor – NEMA 24. *Nanotec* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/550-st6018m2008-a>
- [45] ST6018D4508-A – Stepper motor – NEMA 24. *Nanotec* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/562-st6018d4508-a>
- [46] ST8918D6708-A – Stepper motor – NEMA 34. *Nanotec* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/583-st8918d6708-a>
- [47] Valivá ložiska. *SKF* [online]. 2019 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000\\_1-CS\\_tcm\\_54-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf)
- [48] ContiTech AG - Power Transmission Group - CONTI®Professional. *Continental ContiTech* [online]. 2018 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.conti-professional.com/pages/projekt.html>
- [49] Ozubená řemenice 16-5M-15 (typ 6F, ocel). *Tyma* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/16-5m-15-typ-6f-ocel/>
- [50] ST4209X1004-A – Stepper motor 0.9° – NEMA 17. *Nanotec* [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/453-st4209x1004-a>
- [51] ST4209M1206-B – Stepper motor 0.9° – NEMA 17. *Nanotec* [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/467-st4209m1206-b>
- [52] RepRap Kalkuačka. *Blog Prusa printers* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: [https://blog.prusaprinters.org/cs/reprap-kalkulacka\\_3416/](https://blog.prusaprinters.org/cs/reprap-kalkulacka_3416/)

## Seznam Obrázků

Obrázek 1 SLA [7] .....	4
Obrázek 2 SLS a DMLS [7] .....	5
Obrázek 3 FDM [7] .....	5
Obrázek 4 MJP [7] .....	6
Obrázek 5 BJ [7] .....	6
Obrázek 6 LOM [7] .....	7
Obrázek 7 SHS [7] .....	8
Obrázek 8 DLP [7] .....	8
Obrázek 9 Vyhřívaná podložka [11] .....	10
Obrázek 10 Extruder [12] .....	10
Obrázek 11 HotEnd [13] .....	11
Obrázek 12 Krokový motor [14] .....	11
Obrázek 13 Kartézská tiskárna [16] .....	12
Obrázek 14 Delta 3D tiskárna [17] .....	13
Obrázek 15 Polar tiskárny [15] .....	13
Obrázek 16 Scara tiskárna [18] .....	14
Obrázek 17 Pásová tiskárna [19] .....	14
Obrázek 18 Titan Aero Extruder [20] .....	15
Obrázek 19 E3D Hemera [21] .....	16
Obrázek 20 BMG extruder [23] .....	17
Obrázek 21 Bulldog extruder [24] .....	17
Obrázek 22 Jednoduchý extruder [25] .....	18
Obrázek 23 Polyimidová topná fólie [27] .....	19
Obrázek 24 Silikonová topná fólie [29] .....	19
Obrázek 25 Kolečnice s vozíkem [32] .....	20
Obrázek 26 Kladkový vozík s tyčovým vedením [33] .....	21
Obrázek 27 Vozík s tyčovým vedením a ozubeným řemenem [35] .....	22
Obrázek 28 Kolový vozík vedený V drážkou profilu [36] .....	22
Obrázek 29 Portál .....	24
Obrázek 30 Křížové uspořádání .....	25
Obrázek 31 Pohon portálu 2 motory .....	26
Obrázek 32 Pohon portálu 1 motorem .....	26
Obrázek 33 Pohon osy Z s motorem v horní části rámu .....	27
Obrázek 34 Pohon osy Z s motorem v dolní části .....	28
Obrázek 35 Pohon osy Z dvěma motory .....	28
Obrázek 36 Průběh momentu motoru ST6018M2008-A [44] .....	35
Obrázek 37 Průběh momentu na motoru ST6018D4508-A [45] .....	36
Obrázek 38 Průběh momentu motoru ST8918D6708-A [46] .....	37
Obrázek 39 Vozík 1 .....	41
Obrázek 40 Vozík 2 .....	42
Obrázek 41 Vozík 3 .....	42
Obrázek 42 Průběh momentu motoru tiskové hlavy ST4209X1004-A [50] .....	45
Obrázek 43 Průběh momentu motoru portálu ST4209M1206-B [51] .....	46
Obrázek 44 Rám „malé tiskárny“ .....	48
Obrázek 45 Rám „velké tiskárny“ .....	49
Obrázek 46 Rozložení XY „malé tiskárny“ .....	50
Obrázek 47 Osa Z „malá tiskárna“ .....	50
Obrázek 48 Rozložení XY „velké tiskárny“ .....	51
Obrázek 49 Osa Z „velká tiskárna“ .....	51
Obrázek 50 Uložení pohybového šroubu .....	52
Obrázek 51 Vozík tiskové desky „malé tiskárny“ .....	52
Obrázek 52 Vozík tiskové desky „velké tiskárny“ .....	53



Obrázek 53 Srovnání tiskáren.....	54
Obrázek 54 Porovnání ve 3D pohledu.....	56

## Seznam Tabulek

Tabulka 1 Hmotnosti tištěných dílů .....	29
Tabulka 2 Spojité zatížení na rám tiskové desky.....	30
Tabulka 3 Průhyb a namáhání rámu tiskové desky, výpočet viz Alutec KK [37].....	30
Tabulka 4 Odhad hmotnosti vozíků .....	31
Tabulka 5 Průměry šroubů .....	31
Tabulka 6 Typy šroubů [38] [39] .....	32
Tabulka 7 Momenty potřebné pro otočení šroubů.....	32
Tabulka 8 Trapézové přírubové matice [40] [41].....	33
Tabulka 9 Tuhosti řemenů [42].....	33
Tabulka 10 Tabulka řemenic a protažení řemenů [43].....	34
Tabulka 11 Krokové motory Nanotec [44] [45] [46].....	34
Tabulka 12 Síla ve šroubech .....	38
Tabulka 13 Axiální ložiska SKF [47].....	39
Tabulka 14 Napínací síly řemene volba ložisek [48].....	40
Tabulka 15 Vlastnosti ložisek kladek Alutec KK [35].....	40
Tabulka 16 Vozík 1 .....	41
Tabulka 17 Vozík 2 .....	41
Tabulka 18 Vozík 3 .....	42
Tabulka 19 Síly působící na řemen pohonu tiskové hlavy [48] .....	43
Tabulka 20 Síly působící na řemen pohonu portálu [48].....	43
Tabulka 21 Parametry motorů pro pohon tiskové hlavy a portálu [50] [51] .....	44
Tabulka 22 Rozměrová řada tiskáren.....	55

## Seznam Příloh

Koncepční výkres: Tiskárna 900x900x700 (02-BP1-08-06-000)

Koncepční výkres: Tiskárna 300x300x700 (02-BP1-02-06-000)