



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav konstruování a částí strojů**

**Konceptní návrh osy X velkoformátové 3D  
tiskárny**

**Conceptual Design of X-axis of Large  
Format 3D Printer**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2022**

**Zdeněk KÁLAL**

**Studijní program:** B2341 Strojírenství  
**Studijní obor:** 3901R051 Konstruování podporované počítačem  
**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Mrázek Ph.D.

---

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci bakalářského studia s názvem: „Koncepční návrh osy X velkoformátové 3D tiskárny“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Jiřího Mrázka Ph.D.. Použitá literatura je uvedena na konci v seznamu literatury.

V Praze dne 21. 5 2022

Kálal Zdeněk

Podpis: .....

### Poděkování

Tímto způsobem bych rád poděkoval své rodině, především svým rodičům za trpělivost a podporu během mého studia na vysoké škole. Zároveň bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Mrázkovi Ph.D. za odborné vedení a za jeho rady při zpracovávání závěrečné práce.

## Anotační list

Jméno autora: **Kálal Zdeněk**

Název BP: Koncepční návrh osy X velkoformátové 3D tiskárny  
Anglický název: Conceptual Design of X-axis of Large Format 3D Printer

Rok: 2022  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem  
Ústav: Ústav konstruování a částí strojů  
Vedoucí BP: Ing. Jiří Mrázek Ph.D.

Bibliografické údaje:

počet stran	62
počet obrázků	61
počet tabulek	4
počet příloh	1

Klíčová slova: 3D tisk, Lineární osa, Velkoformátová tiskárna,  
Systém hliníkových profilů, Portálová konstrukce

Keywords: 3D Print, Linear Axis, Large Format Printer  
Aluminium Strut Profile, Portal construction

## Anotace:

Cílem této práce je navrhnout koncepční návrh osy X velkoformátové 3D tiskárny. Pohyb osy X má zajišťovat lineární osa. Bylo navrženo několik variant, ze kterých se na základě výpočtu zvolila nejlepší varianta.

## Abstract:

The aim of this thesis is design to conceptual design of X-axis of large format 3D printer. The linear axis ensures the motion of X-axis. Several variants have been designed, from which the best option was chosen according to calculation.

## Obsah

Seznam zkratek a symbolů .....	1
1. Úvod .....	4
2. Teoretická (metodická) část práce .....	5
2.1. Průběh tisku .....	5
2.1.1. Krok 1. 3D model .....	5
2.1.2. Krok 2. Rozdělení na vrstvy .....	5
2.1.3. Krok 3. Tisk .....	6
2.1.4. Krok 4. Postprocessing .....	6
2.2. Metody tisku .....	7
2.2.1. Pokládání roztavených termoplastů (FFF/FDM) .....	7
2.2.1.1. Kartézské .....	7
2.2.1.2. CoreXY .....	8
2.2.1.3. Delta .....	8
2.2.1.4. Polar .....	9
2.2.2. Základní konstrukční prvky FDM tiskáren .....	10
2.2.2.1. Tisková hlava .....	10
2.2.2.2. Tisková podložka .....	11
2.2.2.3. Pohony .....	11
2.2.2.4. Rám .....	12
2.2.2.5. Vedení .....	12
2.2.2.6. Řídící jednotka .....	13
2.2.3. Materiál pro FDM tiskárny .....	13
2.2.3.1. PLA .....	14
2.2.3.2. PETG .....	14
2.2.3.3. ABS .....	14
2.2.3.4. ASA .....	15
2.2.4. Stereolitografie (SLA) .....	16
2.2.4.1. SLA-Laser .....	16
2.2.4.2. DLP (Digital Light Processing) – SLA .....	17
2.2.4.3. MSLA (Mask Stereolithography) .....	17
2.2.4.4. SLS (Selective Laser Sintering) .....	18
2.2.4.5. DMLS (Direct Metal Laser Sintering) .....	19
2.3. Kinematické uspořádání .....	20
2.3.1. Kartézské kinematické uspořádání .....	20
2.3.1.1. Kinematický řetězec tiskové hlavy .....	20
2.3.1.2. Kinematický řetěze podložky .....	20
2.3.2. Kinematické uspořádání XY Core .....	21
2.3.2.1. Kinematický řetězec tiskové hlavy .....	21
2.3.2.2. Kinematický řetěze podložky .....	21
2.3.3. Kinematické uspořádání Delata .....	21
2.3.4. Kinematické uspořádání Polar .....	22

<b>2.4.</b>	<b>Komponenty tiskárny, které lze koupit (FDM tiskárny) .....</b>	<b>22</b>
2.4.1.	Unifikované celky: .....	22
2.4.2.	Normalizované díly: .....	22
<b>2.5.</b>	<b>Velkoformátový tisk .....</b>	<b>23</b>
2.5.1.	Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) .....	23
2.5.2.	Big Area Additive Manufacturing (BAAM) .....	23
2.5.2.1.	Tisková hlava .....	24
2.5.2.2.	Tiskové podložky .....	24
2.5.2.3.	Rámy velkoformátových tiskáren .....	25
2.5.3.	3D tisk ve stavebnictví.....	26
2.5.3.1.	3D tisk z cementových malt .....	26
2.5.3.2.	3D tisk spojováním kameniva.....	27
2.5.4.	Konstrukce 3D tiskáren ve stavebnictví.....	27
2.5.4.1.	Rámové 3D tiskárny .....	27
2.5.4.2.	3D tiskárny s robotickou rukou .....	28
2.5.4.3.	Mobilní 3D tiskárny .....	29
<b>3.</b>	<b>Praktická část .....</b>	<b>29</b>
3.1.	Lineární osa .....	30
3.1.1.	Konstrukce lineární osy .....	30
3.2.	Orientační výpočet maximálního zatížení LO.....	31
3.2.1.	Vztahy pro průhyb .....	31
3.3.	Výpočet maximálního zatížení pro jednotlivé verze nosníku .....	33
3.3.1.	Verze 1.....	33
3.3.2.	Verze 2.....	34
3.3.3.	Verze 3.....	35
3.3.4.	Výběr nejvhodnější verze .....	36
3.4.	Výpočet zatížení ložisek vozíku.....	36
3.4.1.	Určení sil a momentů .....	37
3.4.2.	Zatížení jednotlivých ložisek .....	38
3.4.3.	Životnost ložisek .....	39
3.4.4.	Únosnost vozíku LO .....	40
3.5.	Výpočet šroubového spoje.....	40
3.5.1.	Kontrola tlaku v dosedací ploše pod šroubem.....	43
	Kontrola tlaku v závitu .....	44
3.5.2.	Stanovení potřebného utahovacího momentu na klíči pro 1 šroub s respektováním třecího momentu pod hlavou šroubu .....	44
3.6.	Stavebnicový systém Bosch Rexroth .....	44
3.6.1.	Hliníkové profily.....	44
3.6.1.1.	Obrábění profilů.....	45
3.6.2.	Spojovací prvky .....	46
3.6.2.1.	Přírubová matice a T-šroub .....	46
3.6.2.2.	Centrální šroub (Central bolt) .....	46
3.6.2.3.	T-matice.....	47



3.6.2.4.	Paralelní spojka .....	47
3.6.2.5.	Rychlospojka.....	48
3.6.2.6.	Ohebná rychlospojka end-to-end.....	48
3.6.2.7.	Ohebná rychlospojka end-to-slot .....	49
3.6.2.8.	Svorníková spojka .....	49
3.6.2.9.	Vnitřní držák (Inner bracket) .....	50
3.7.	Konstrukční řešení osy X .....	50
3.7.1.	Nohy portálu .....	51
3.7.1.1.	Horní deska .....	52
3.7.1.2.	Spodní deska .....	52
3.7.1.3.	Žebra.....	53
3.7.2.	Konstrukce nosníku .....	53
3.7.3.	Spoj mezi nohou a nosníkem .....	55
3.8.	Montáž .....	56
3.8.1.	Montáž nosníku .....	56
3.8.2.	Montáž nohou .....	56
3.8.3.	Montáž portálu .....	56
4.	Závěr.....	57
5.	Seznam použité literatury.....	58
6.	Seznam obrázků .....	60
7.	Seznam tabulek.....	62
8.	Seznam příloh .....	62

**Seznam zkratk a symbolů**

Zkratka	Jednotky	Poznámka
$q$	[N/m]	Jednotkové zatížení
$m_n$	[kg/m]	Hmotnost nosníku na jeden metr
$F$	[N]	Síla zatěžující nosník
$l$	[m]	Délka nosníku
$R_A$	[N]	Reakce v podpoře A
$R_B$	[N]	Reakce v podpoře B
$M_o(x)$	[Nmm]	Ohybový moment
$r_A$	[1]	Reakce od jednotkové síly v podpoře A
$r_B$	[1]	Reakce od jednotkové síly v podpoře B
$m_o$	[mm]	Ohybový moment od jednotkového zatížení
$v$	[mm]	Posuv ve svislém směru
$F_{max}$	[N]	Maximální zatížení nosníku
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Modul pružnosti
$J$	[mm <sup>4</sup> ]	Kvadratický moment
$A_p$	[mm <sup>2</sup> ]	průřez profilu
$c$	[mm]	vzdálenost os
$F_r$	[N]	Radiální síla
$F_a$	[N]	Axiální síla
$A$	[mm]	Vzdálenost vozíků
$B$	[mm]	Vzdálenost mezi kolejnicemi
$M_x$	[Nmm]	Moment kolem osy X
$M_y$	[Nmm]	Moment kolem osy Y
$M_z$	[Nmm]	Moment kolem osy Z
$m$	[kg]	Hmotnost extruderu
$e$	[mm]	Vzdálenost těžiště od vozíku
$P_1$	[N]	Ekvivalentní dynamické zatížení
$P_{01}$	[N]	Ekvivalentní statické zatížení
$x$	[1]	konstanta z katalogu výrobce
$x_0$	[1]	konstanta z katalogu výrobce
$y$	[1]	konstanta z katalogu výrobce
$y_0$	[1]	konstanta z katalogu výrobce
$S_0$	[1]	Statická bezpečnost
$C$	[N]	Dynamická únosnost ložisek
$C_0$	[N]	Statická únosnost ložisek
$L$	[m]	Životnost ložisek
$L_h$	[hod]	Životnost ložisek





s	[m]	Délka zdvihu
$n_s$	[min <sup>-1</sup> ]	Zdvihová frekvence
$m_p$	[hg]	Hmotnost portálu
a	[m/s <sup>2</sup> ]	Zrychlení portálu
Q	[N]	Montážní přepětí
$Q_0$	[N]	Montážní přepětí pro jednotlivé šrouby
k	[1]	Bezpečnost šroubového spoje
f	[1]	Součinitel tření
i	[1]	Počet šroubů
$\gamma$	[°]	úhel stoupání
P	[mm]	Stoupání závitu
$d_2$	[mm]	Střední průměr závitu
$\beta_n$	[°]	Úhel boku profilu
$\varphi'$	[°]	Třecí úhel
$f_z$	[1]	Součinitel tření v závitu
$\sigma_{tš}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Napětí od namáhání v tahu
$d_3$	[mm]	Malý průměr závitu
$M_{kš}$	[Nmm]	Kroutící moment
$W_{kš}$	[mm <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v krutu
$\tau$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Smykové napětí
$\sigma_{red}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Redukované napětí
$\alpha$	[°]	Konstanta dle energetické hypotézy
$k_\sigma$	[1]	Bezpečnost
$R_{1H}$	[mm]	Poloměr díry pro šroub
$R_{2H}$	[mm]	Poloměr hlavy šroubu
$e_š$	[mm]	Průměr hlavy šroubu
$p_{Hš}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Tlak na dosedací ploše šroubu
$p_{DM(H)}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Dovolený tlak na dosedací ploše šroubu
$D_1$	[mm]	Průměr díry pro šroub
$z_T$	[1]	Počet závitů v matici
$m_m$	[mm]	Výška matice
d	[mm]	Velký průměr závitu šroubu
$M_{Tš}$	[Nmm]	Třecí moment pod hlavou šroubu
$M_{KK}$	[Nmm]	Výsledný utahovací moment

Značka	Význam
--------	--------

3D	Trojrozměrný
----	--------------

2D	Dvojměrný
----	-----------

CAD	Computer aided design
-----	-----------------------

STL	Standard triangle language
-----	----------------------------



---

CNC	Computer numerical control
PC	Personal computer
UV	Ultraviolet
SLA	Stereolitografie
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PLA	Polyactic acid
PET	Polyethylentereftalát
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
DLP	Digital Light Processing
MSLA	Mask Stereolithography
LCD	Liquid crystal display
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
BAAM	Big Area Additive Manufacturing
PAM	Pellet additive manufacturing
LO	Lineární osa

## 1. Úvod

V této práci se budu zabývat 3D tiskem. V úvodu se seznámíme s principem funkce jednotlivých metod tisku a dále se budu podrobněji věnovat metodě FDM, která je v současné době nejrozšířenější, a i navrhovaná tiskárna bude pracovat na tomto principu.

Velkoformátový 3D tisk je relativně nová, rychle se rozvíjející technologie výroby používaná zejména pro výrobu prototypů. Cílem této metody je tisknout co největší modely za co nejkratší čas. Navrhovaná tiskárna bude řešena jako stavebnicový systém hliníkových konstrukcí Bosch Rexroth. Práce je zaměřena na osu X, která bude řešena jako portál. Pohyb bude zajišťovat již zakoupená lineární osa LF12 od firmy Bosch Rexroth. Zdvih osy je 3000mm.

Cíle práce:

- Zpracování rešerše problematiky konstrukce velkoformátových 3D tiskáren.
- Koncepční návrh řešení osy X
- Zpracování návrhových a kontrolních výpočtů
- Zpracování konceptního 3D modelu řešení
- Vytvořit 2D konceptní výkres řešení

## 2. Teoretická (metodická) část práce

3D tisk je výrobní proces, při kterém postupným vrstvením nebo vytvrzováním materiálu vzniká objekt požadovaných tvarů a rozměrů. Jedná se o aditivní technologii, to znamená, že se materiál přidává na rozdíl od obráběcích procesů, kde materiál odebíráme pro dosažení požadovaného tvaru. Jako předloha pro 3D tisk slouží model v digitální formě.

### 2.1. Průběh tisku

Průběh tisku je pro všechny metody tisku velice podobný a dá se rozdělit do několika kroků.

#### 2.1.1. Krok 1. 3D model

Prvním krokem je vždy vytvoření digitálního modelu. Toho lze dosáhnout v jakémkoli CAD softwaru nebo za pomoci 3D skeneru. Při použití skeneru může být zapotřebí model opravit nebo upravit v CAD softwaru. Jako poslední krok při tvorbě modelu je převedení modelu do formátu STL pro další práci s modelem.

Při tvorbě modelu je dobré předem zvolit metodu tisku a volit takový tvar, aby se minimalizoval počet potřebných podpor. Správnou volbou tvaru a orientace modelu můžeme výrazně snížit čas tisku a potřebný materiál. Vytvoření modelu je u většiny případů časově náročné a vyžaduje znalost programu, ve které je model zhotovován. [22]

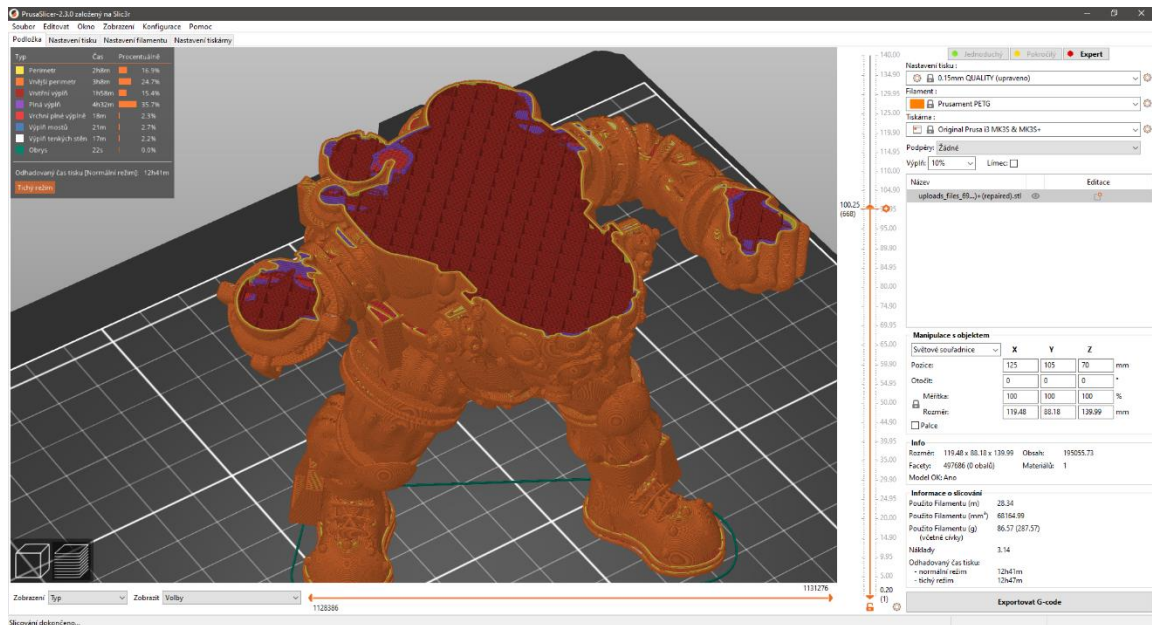


*Obrázek 1 Model v programu Blender [Autor]*

#### 2.1.2. Krok 2. Rozdělení na vrstvy

Dalším nezbytným krokem je model ve formátu STL rozdělit na jednotlivé vrstvy. K tomu se využívají slicery. Slicery jsou programy, ve kterých nastavujeme veškeré parametry tisku a výstupem je G-code. Hlavními parametry pro FDM tiskárny jsou teplota podložky a trysky, použitý materiál, infill, výška vrstvy a podpěry. Například u SLA tiskáren je hlavní parametr doba vytvrzování materiálu.

G-code obsahuje veškeré informace pro tiskárnu. Skládá se z G kódů, kterými popisujeme pohyb tiskové hlavy (extruderu) a podložky a z M kódů, kterými řídíme jednotlivé části tiskárny (teploty, ofuk atd.). G-code je velice podobný tomu, který je používán k řízení CNC strojů. [1, 22]



Obrázek 2 Příprava modelu ve sliceru [Autor]

### 2.1.3. Krok 3. Tisk

Tisk spočívá v nepřetržitém přivádění informací obsažené v G-codu na tiskárnu. Tiskárna tyto informace zpracovává a vykonává úkony popsané G-codem. Přenos informací nesmí být v průběhu tisku přerušeno. Přerušeno vede k nenávratnému porušení tisku. Jednou z možností dodávání souboru s G-codem na tiskárnu je za pomoci SD karty, USB flash disku nebo jiného podobného média. Tento způsob je bezpečný, jelikož nezávisí na dalším zařízení. Další možností je připojení PC k tiskárně. Nevýhodou této možnosti, je riziko problému na straně počítače. Při tisku může dojít k vypnutí, restartování či jinému problému, který vede k přerušeno dodávání dat na tiskárnu, a tedy k zničení tisku. [22]

### 2.1.4. Krok 4. Postprocesing

Postprocesing je označení pro dokončovací operace. Většinu výtisků můžeme ihned použít jako hotovou součást. Pokud ovšem chceme dosáhnout lepších výsledků drsnosti povrchu nebo vzhledu výtisku musíme model upravit pomocí některé z dokončovacích operací, nebo jejich kombinací. Model je možné brousit, kytovat tmelem, laminovat, barvit akrylovými barvami, stříkat barvami ve spreji atd. Způsobů úpravy výtisku je mnoho, ale musíme počítat s možnou ztrátou některých detailů při použití metod jako jsou tmelení či kytování.

Při použití SLA metody tisku je postprocessing nutné provádět. Model po dokončení tisku není vhodný k okamžitému použití, jako u FDM tisku. Model je potřeba očistit od přebytečné pryskyřice a dodatečně vytvrdit UV světlem. K tomu se používají čistící stanice. Po očištění je možné součást používat, nebo ji dále upravovat již zmíněnými metodami. [22]

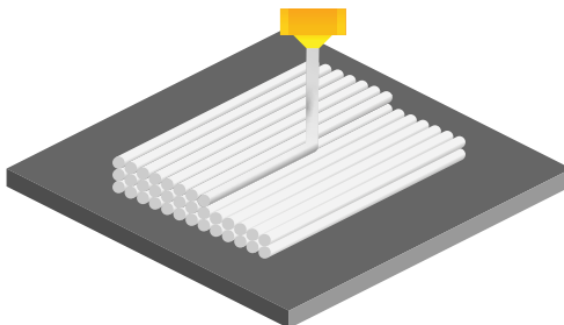
## 2.2. Metody tisku

V následující kapitole se seznámíme s jednotlivými metodami 3D tisku a stručným popisem nejčastěji používaných materiálů pro FDM tiskárny.

### 2.2.1. Pokládání roztavených termoplastů (FFF/FDM)

Tuto metodu 3D tisku v roce 1988 vynalezl Scott Crump spoluzakladatel společnosti Stratasys Inc., která začala tuto metodu zdokonalovat.

Výrobek vzniká postupným vrstvením roztaveného termoplastu, který je přiváděn do pohyblivé tiskové hlavy, kde je roztaven a vytlačován z trysky do prostoru tisku. Materiály jsou dodávány ve formě strun navinutých na cívkách. V současné době se jedná o nejrozšířenější a nejdostupnější metodu 3D tisku používanou jak v průmyslu, tak širokou veřejností. Podle způsobu pohybu můžeme tiskárny rozdělit do několika kategorií. [2, 3, 4, 22]



*Obrázek 3 Metoda FDM [22]*

#### 2.2.1.1. Kartézské

Kartézské 3D tiskárny jsou v současné době nejrozšířenější. Základem je pohyb po třech na sebe kolmých lineárních osách. Tisková hlava se pohybuje po ose X a Z zatímco podložka po ose Y. Tiskový prostor se v dnešní době pohybuje kolem 20 až 30 cm v každém směru. Díky jednoduchosti této konstrukce jsou tyto tiskárny cenově dostupné. [5, 22]



*Obrázek 4 Kartézská 3D tiskárna [22]*

### **2.2.1.2. CoreXY**

Tento typ tiskáren je variací kartézského systému. Rozdílem je pohyb extruderu v ose X, Y a podložky v ose Z. Tato konstrukce má vyšší tuhost je vhodnější pro větší tiskárny. Díky nepohyblivé tiskové podložce (ve směru Y) můžeme dosáhnout vyšší rychlosti tisku. [5, 22]



*Obrázek 5 CoreXY [23]*

### **2.2.1.3. Delta**

Tiskárny typu delta mají tiskovou hlavu zavěšenou na třech pohyblivých ramenech, která jsou posazena na lineárním vedení. Výhodou tohoto provedení je větší výška osy Z a rychlost tisku. Nevýhodou je nižší úroveň detailů a složitější výpočet pohybů tiskové hlavy. [5, 22]



*Obrázek 6 Delta [22]*

#### **2.2.1.4. Polar**

Polar je málo používané provedení. Kruhová tisková podložka vykonává rotační a posuvný pohyb, zatímco tisková hlava se pohybuje pouze v ose Z. Výsledkem je jednoduchá konstrukce a k pohybu tiskárny stačí pouze dva krokové motory. Podložka není vyhřívaná, jelikož by při rotačním pohybu podložky hrozilo poškození napájecích kabelů. To vede ke komplikacím hlavně při použití materiálů jako je například ABS. [5, 22]



*Obrázek 7 Polar [22]*

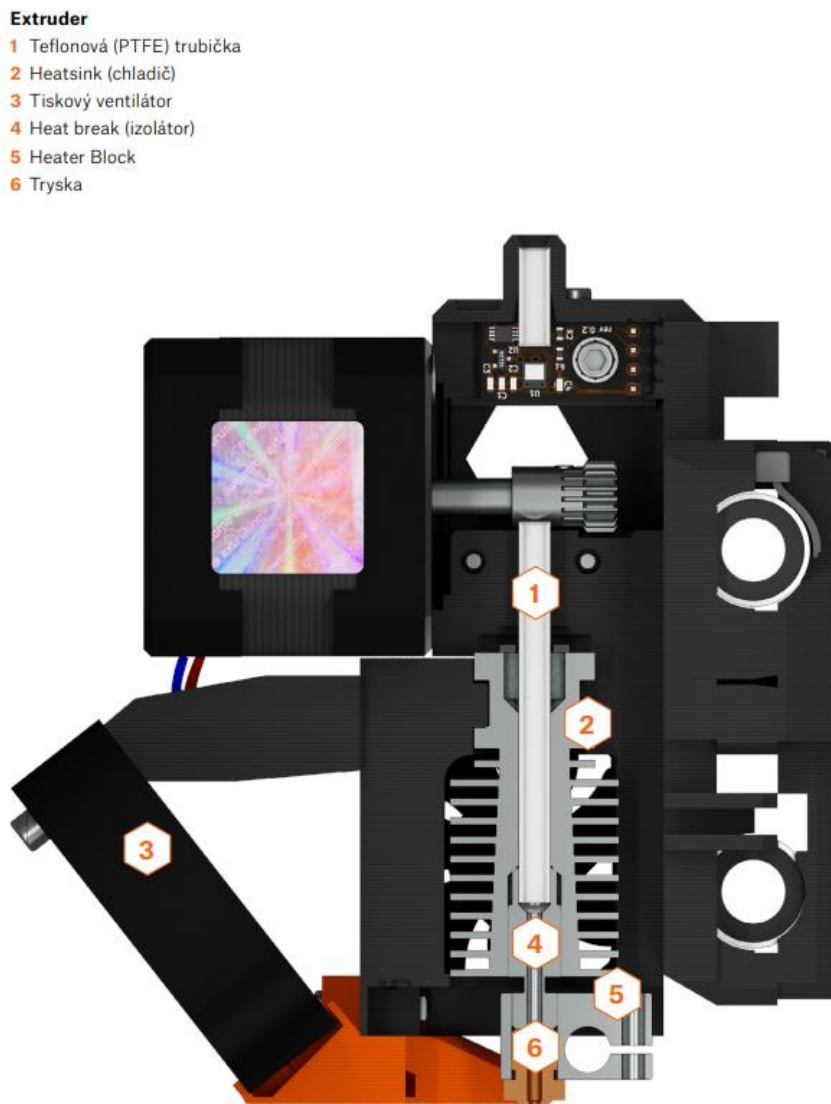


## 2.2.2. Základní konstrukční prvky FDM tiskáren

V této kapitole jsou ukázány jednotlivé konstrukční prvky FDM tiskáren a stručný popis jejich funkce.

### 2.2.2.1. Tisková hlava

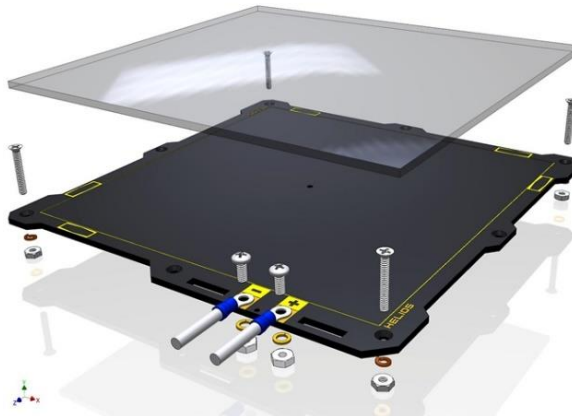
Tisková hlava neboli extruder slouží k nanášení roztaveného materiálu. Skládá se z několika hlavních částí. Do extruderu za pomoci cívek přivádíme materiál skrze teflonovou trubičku. Dále materiál putuje skrze chladič a izolátor do Heater blocku, kde je materiál roztaven a skrze trysku vytlačován prostoru tisku. Chladič slouží k odvedení tepla, které se šíří přes izolátor. Pro vyšší účinnost chlazení je extruder vybaven ventilátorem. Trysky se vyrábí v několika velikostech a z různých materiálů. Velikost průměru trysky ovlivňuje kvalitu a rychlost tisku. Standartně používaný průměr je 0,4 mm. Na obrázku [Obrázek 8] jsou vidět jednotlivé části tiskové hlavy. [5, 22]



Obrázek 8 Tisková hlava [22]

### 2.2.2.2. Tisková podložka

Tiskové podložky se provádějí s vyhříváním nebo bez vyhřívání. Vyhřívání slouží k lepšímu přilnutí první vrstvy a zabraňuje ke kroucení výtisku, ke kterému dochází při nerovnoměrném chladnutí materiálu. Z toho vyplývá, že vyhřívání podložky je velmi užitečné, ale ne vždy nutné. Každý materiál má jiné tiskové vlastnosti a některé lze tisknout i bez nutnosti vyhřívání. [5, 22]



*Obrázek 9 Tisková podložka [24]*

### 2.2.2.3. Pohony

Pro pohon tiskové hlavy a podložky po jednotlivých osách a pro dodávání materiálu do extruderu se používají krokové motory. Výhodou těchto motorů je definovaná velikost kroku a nízká cena. V profesionálních tiskárnách se používají servomotory s integrovaným encoderem. [22]



*Obrázek 10 Krokový motor [22]*

#### 2.2.2.4. Rám

Rám je nosná konstrukce tiskárny. Nejdůležitější parametr je jeho tuhost, která má vliv na přesnost a kvalitu tisku. Při tisku nevznikají velké síly, proto rám nemusí být tak masivní, jako například u obráběcích strojů. Rámy často bývají složeny z profilů ze slitiny hliníku spojeny šroubovým spojem. [22]



*Obrázek 11 Rám [22]*

#### 2.2.2.5. Vedení

Síly přenášené v jednotlivých osách nejsou veliké, ale je požadována opakovatelná přesnost. Z tohoto důvodu se používá valivé vedení. U profesionálních a velkoformátových 3D tiskáren se převážně používají lehčí řady lineárních kolejnic s vozíky s recirkulačními kuličkami. U hobby tiskáren se setkáme s nepodepřenými vodícími tyčemi s lineárními vozíky. [22]



*Obrázek 12 Lineární vedení [29]*

### 2.2.2.6. Řídící jednotka

Řídící jednotka zajišťuje chod celé tiskárny primárně však slouží ke čtení souboru obsahující G-code, podle kterého se řídí jednotlivé pohony a všechny ostatní potřebné části tiskárny. [22]



*Obrázek 13 Řídící jednotka [22]*

### 2.2.3. Materiál pro FDM tiskárny

Pro FDM tiskárny se nejčastěji používají termoplasty, které se do tiskové hlavy přivádějí v pevném skupenství ve formě struny. V současné době se nejčastěji setkáme se strunami o průměru 1,75 mm. Dříve se používaly struny o průměru 3 mm, ale použití tohoto typu mělo špatný vliv na přesnost tisku. Nejběžnější filamenty jsou PLA, ASA a PETG. Každý z těchto materiálů má své výhody a nevýhody a díky jejich dostupnosti se vyrábí v nejrůznějších barvách. Dále se můžeme setkat s flexibilním materiálem, materiálem s příměsí uhlíkového vlákna nebo s materiálem speciálně určeného k tisku podpor. Filamenty se dodávají navinuté na cívkách o různých hmotnostech. [3, 22]



*Obrázek 14 Filament ve formě struny [28]*

### 2.2.3.1. PLA

Polylactic acid (PLA) je biologicky odbouratelný termoplast vyroben z přírodních obnovitelných zdrojů, jako je cukrová třtina, kukuřičný škrob nebo brambory. Jedná se o nejpoužívanější materiál pro 3D tisk a díky jeho původu je šetrný k přírodě. Při tisku nezapáchá proto ho lze používat i v uzavřených prostorech jako jsou laboratoře nebo domácnosti. Výhodou PLA je jeho malá teplotní roztažnost, jednoduchý pro tisk, tvrdost a jeho cena. Nevýhodou jsou křehkost, menší mechanická únosnost a malá teplotní odolnost. [3, 10, 22]

Parametry tisku pro materiál PLA:

- Hustota: 1250 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tisku: 185 – 235 °C
- Teplota tiskové hlavy: 150 – 210 °C
- Teplota podložky: 0 – 60 °C

### 2.2.3.2. PETG

PETG je směsí PET a glycerolu. Glykol ve směsi zajišťuje menší křehkost a zlepšuje vlastnosti tisku. Hlavní předností tohoto materiálu je jeho pevnost, tepelná odolnost a do určité míry jeho flexibilita. Díky tomu je vhodný materiál na mechanické součásti. Stejně jako PLA je cenově dostupný a při tisku nezapáchá. Tisk z tohoto materiálu je lehce obtížnější než tisk z PLA. [3, 22]

Parametry tisku pro materiál PETG:

- Hustota: 1350 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tiskové hlavy: 210 – 235 °C
- Teplota podložky: 45 – 60 °C

### 2.2.3.3. ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je termoplastický průmyslový kopolymer, který je ve světě 3D tisku již od jeho začátku. ABS byl jedním z prvních plastů, jež byly použity v průmyslových tiskárnách. Jedná se o velmi odolný materiál, obsahující příměs syntetického kaučuku, díky kterému je odolný vůči opotřebením a nárazům. Další výhodou je možnost chemického vyhlazení. Nevýhodami tohoto materiálu jsou zápach při tisku a obtížnější tisk. ABS se při chladnutí více kroutí a je náchylný na změnu teplot, proto je vhodné tento materiál tisknout v uzavřeném boxu. [3, 8, 9, 22]

Parametry tisku pro materiál ABS:

- Hustota: 1050 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tisku: 220 – 240 °C
- Teplota tiskové hlavy: 220 – 275 °C
- Teplota podložky: 100 – 130 °C

#### 2.2.3.4. ASA

Akrylonitril-styren-akryl (ASA) je nástupcem materiálu ABS. Tento materiál má dobrou mechanickou odolnost, tuhost a odolnost proti teplotě. Výhodou ASA oproti ABS je UV stabilita a odolnost proti povětrnostním vlivům, tudíž je vhodný i pro venkovní použití. Další výhodou je kvalita vytištěných dílů, které stejně jako u ABS je možné vyhlazovat acetonovými parami. ASA se při tisku méně smršťuje, ale u velkých výtisku může stále docházet ke kroucení a odlepování rohů objektu od podložky. Nevýhodou stále zůstává zápach při tisku, která je menší než u tisku z ABS. [21, 22]

Parametry tisku pro materiál ASA:

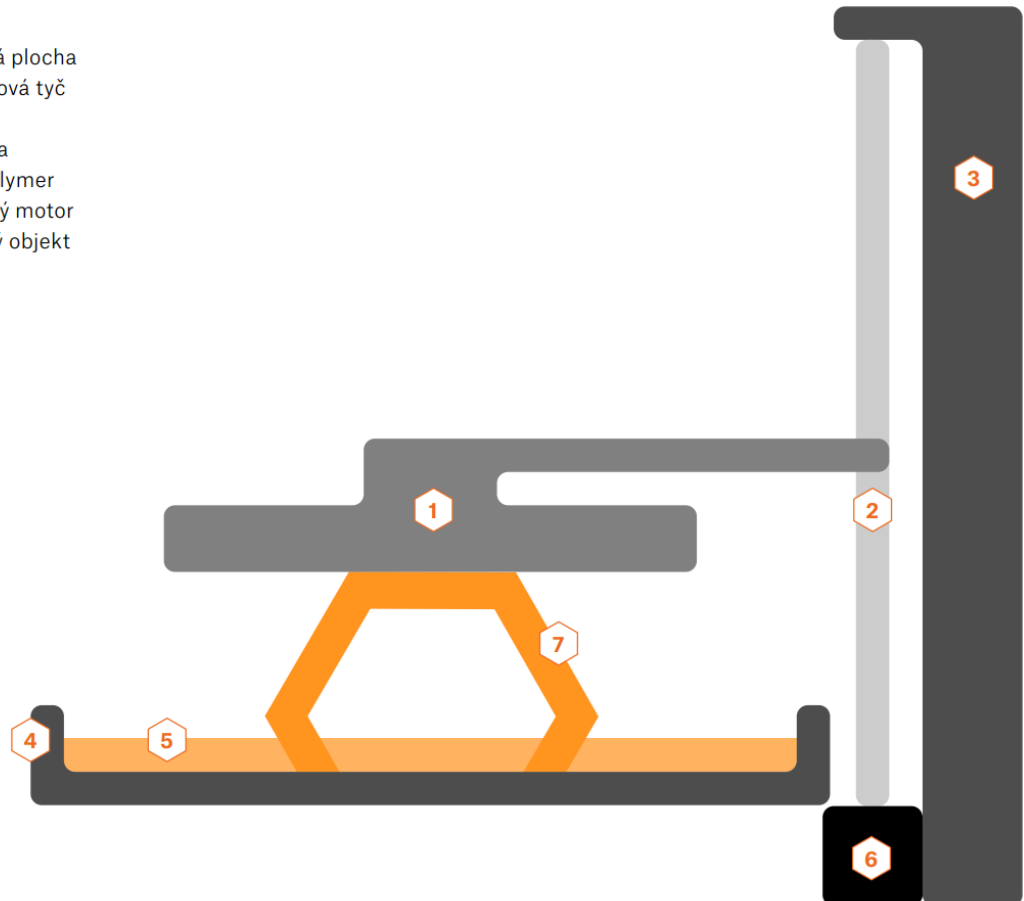
- Hustota: 1070 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tisku: 250 – 255 °C
- Teplota podložky: 60 – 100 °C

### 2.2.4. Stereolitografie (SLA)

SLA technologie je založena na principu vytvrzování světlocitlivé pryskyřice pomocí světla. Podložka se při každé vrstvě posune a proběhne vytvrzení fotopolymery na požadovaných místech. Výhodou této technologie je její přesnost. Je vhodná pro tisk malých, detailních objektů. Z tohoto důvodu se hodí především v medicíně a šperkařství. Nevýhodou je velikost tiskové plochy a toxicita materiálu.

Existují tři hlavní metody SLA tisku, které se liší způsobem vytvrzení materiálu. [2, 22]

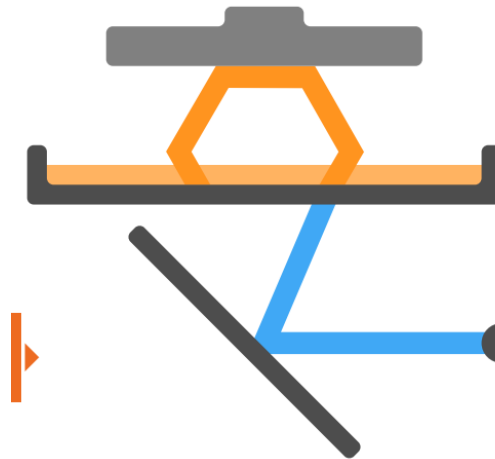
- 1 Tisková plocha
- 2 Trapézová tyč
- 3 Osa Z
- 4 Vanička
- 5 Fotopolymer
- 6 Krokový motor
- 7 Tištěný objekt



Obrázek 15 Části SLA tiskárny [22]

#### 2.2.4.1. SLA-Laser

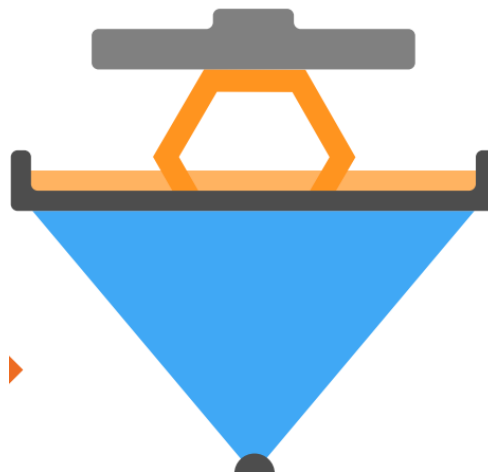
Model je vytvrzován UV laserovým paprskem, který je směřován dvěma zrcadly a postupně vytvrzuje vrstvu materiálu. Doba tisku je závislá na velikosti plochy, která se v dané vrstvě vytvrzuje. [22]



*Obrázek 16 Metoda SLA-Laser [22]*

#### **2.2.4.2. DLP (Digital Light Processing) – SLA**

U této metody probíhá osvit celé vrstvy najednou pomocí digitálního projektoru. Výhodou je kratší doba tisku, jelikož vytvrzení každé vrstvy trvá stejně dlouho nezávisle na počtu nebo velikosti tištěných objektů. [22]

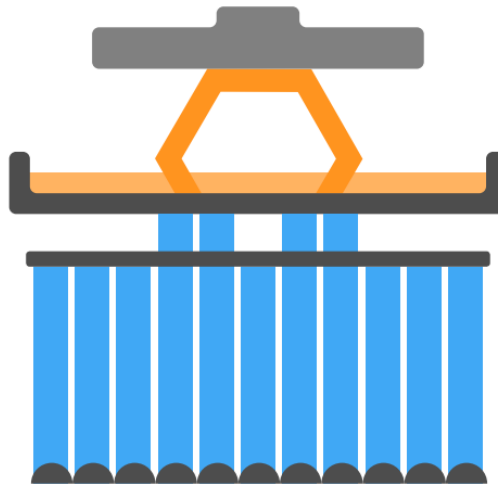


*Obrázek 17 Metoda DLP-SLA [22]*

#### **2.2.4.3. MSLA (Mask Stereolithography)**

Osvit pomocí UV LED a maskování celé tiskové vrstvy LCD displejem. UV světlo prostoupí jen tam, kde jsou pixely aktivované a jen tam dojde k vytvrzení pryskyřice. Stejně jako u metody DLP se vrstva vytvrzuje najednou, tudíž můžeme tisknout více objektů najednou za stejný čas. [22]

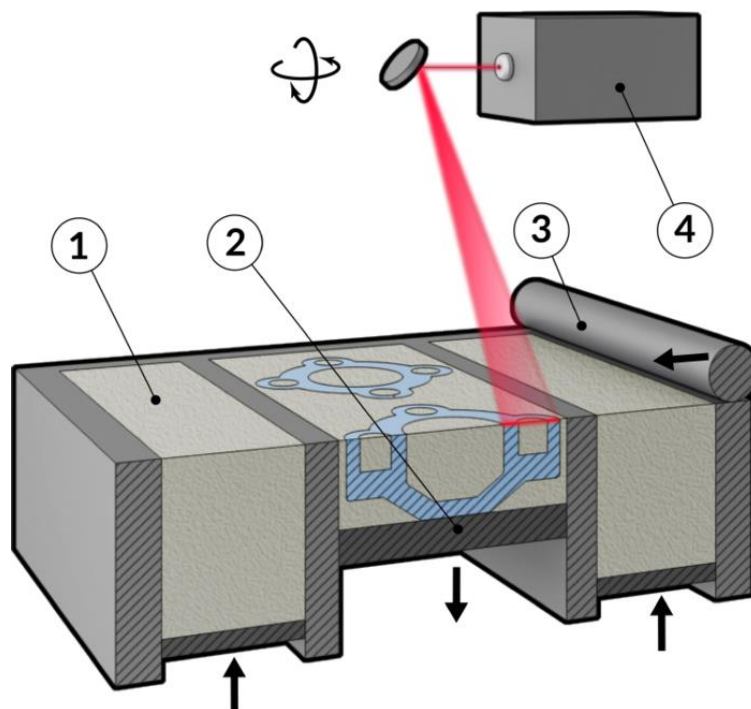




Obrázek 18 Metoda MSLA [22]

#### 2.2.4.4. SLS (Selective Laser Sintering)

Tisk probíhá tak, že válec nanese materiál v podobě jemného prášku, který je spékán pomocí laseru. Poté se podložka posune níže a vytváří se další vrstva. Tento proces se opakuje, dokud není model hotový. Po dokončení tisku je model zasypaný v tiskovém materiálu. Z tohoto důvodu je nutné do modelu vytvořit díry pro vyjmutí přebytečného materiálu. Výhoda této metody je, že nejsou potřeba podpěry, jelikož je výtisk vždy obklopen nespečeným materiálem. Další výhody jsou odolné výtisky a dobrá chemická odolnost. Nevýhodami jsou vysoká cena tiskárny, nákladné čištění výtisku a tiskárny od prášku a vysoká spotřeba materiálu. Kvůli složitému čištění firmy tyto tiskárny používají jen na jeden materiál. [6, 25]



Obrázek 19 Schéma SLS 1-prášek, 2-tisková podložka, 3-válec, 4-zdroj světla [25]

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

Jedná se jednu z metod kovového 3D tisku. DMLS metoda se velmi podobá metodě SLS. Rozdílem je, že při tomto procesu nedochází ke spékání, ale k úplnému roztavení kovového materiálu. Díky tomu vzniká homogenní model s lepšími fyzikálními vlastnostmi a lze ho použít jako funkční finální výrobek. Celý proces výroby musí probíhat ve ochranné atmosféře. Ochranná atmosféra je tvořena inertním plynem jako je dusík nebo argon. Tisk stejně jako u metody SLS nepotřebuje podpěry, to umožňuje tisknout tvary, kterých by nebylo možné dosáhnout běžnými výrobními procesy.

Tisknout lze z různých kovů jako je hliník, ocel, kobalt, měď, titan nebo wolfram. Všechny materiály musí být před tiskem rozemlety na jemný prášek.

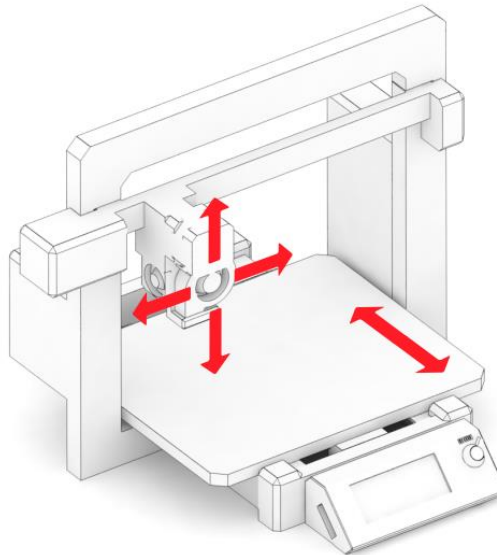
Tato metoda je velice drahá proto je vhodná jen pro profesionální použití. [7]

## 2.3. Kinematické uspořádání

Spojením několika těles kinematickými dvojicemi získáme tzv. kinematický řetězec. Pro každý typ konstrukce tiskárny se bude kinematický řetězec lišit. Důležitým parametrem je počet stupňů volnosti, který určuje kolik nezávislých pohybů může struktura vykonávat. Každý nezávislý pohyb musí být vybaven vlastním pohonem. [34]

### 2.3.1. Kartézské kinematické uspořádání

Kartézské kinematické uspořádání se skládá ze dvou kinematických řetězců. Jeden řetězec zajišťuje pohyb podložky a druhý řetězec pohyb tiskové hlavy. Celkový počet stupňů volnosti je 3, to znamená, že pro zajištění pohybu tiskárny potřebujeme alespoň tři pohony. Tisková plocha je hranol a při tisku nedochází ke změně orientace tisknutého objektu.



*Obrázek 20 Kartézské kinematické uspořádání [22]*

#### 2.3.1.1. Kinematický řetězec tiskové hlavy

Tento řetězec je složen ze dvou posuvných kinematických dvojic kolmých na sebe. Osa Z je posuvnou vazbou spojena s rámem tiskárny a náhon této osy je obvykle zajištěn lichoběžníkovým šroubem a maticí. Osa X, na které je posuvně připevněna tisková hlava, je posuvně spojena s osou Z a náhon je zajištěn ozubeným řemenem.

#### 2.3.1.2. Kinematický řetězec podložky

Tento řetězec je složen z jedné posuvné vazby mezi rámem a podložkou. Náhon osy Y zajišťuje ozubený řemen.

### 2.3.2. Kinematické uspořádání XY Core

Velice podobné jako u kartézského uspořádání. Jak již bylo zmíněno podložka se pohybuje v ose Z a tisková hlava v osách X a Y. Tento typ kinematického uspořádání se skládá ze dvou kinematických řetězců.

#### 2.3.2.1. Kinematický řetězec tiskové hlavy

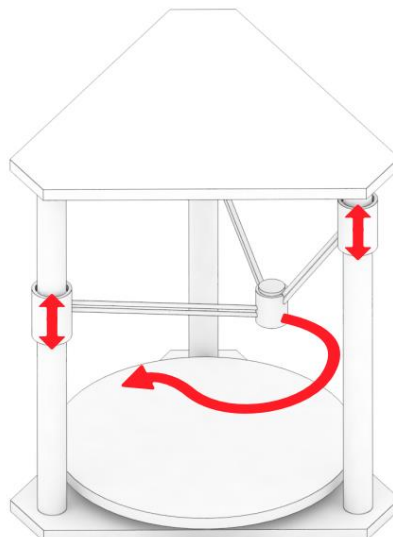
Tisková hlava je stejně jako u kartézského uspořádání posuvnou vazbou připevněna k ose X. Osa X je posuvnou vazbou spojena s osou Y, která je spojena s rámem tiskárny. Náhon obou os je zajištěn ozubeným řemenem.

#### 2.3.2.2. Kinematický řetězec podložky

Tento řetězec je složen z jedné posuvné vazby mezi rámem a podložkou. Náhon osy Y zajišťuje šroub a matice. Podložka se pohybuje ve vertikálním směru.

### 2.3.3. Kinematické uspořádání Delata

Kinematické uspořádání Delta je složeno ze tří paralelně řazených kinematických řetězců. Tisková hlava je rotační vazbou spojena s ramenem, které je rotační vazbou spojené s vozíkem posuvné vazby. Vedení posuvné vazby je pevně spojeno s rámem tiskárny. Tiskárna je vybavena třemi rameny. Náhon každé posuvné vazby je realizováno lichoběžníkovým šroubem a maticí nebo ozubeným řemenem. Pracovním prostorem tiskárny je válec a při tisku nedochází k změně orientace objektu.



*Obrázek 21 Kinematické uspořádání Delta [22]*

#### 2.3.4. Kinematické uspořádání Polar

Kinematické uspořádání Polar se provádí ve dvou variantách. První varianta má otočný a zároveň posuvný stůl a tisková hlava se posouvá pouze v ose Z. Druhá varianta má pouze otočný stůl a tisková hlava se posouvá v ose Y a Z. Tiskový prostor je válec a při tisku dochází ke změně orientace objektu.

### 2.4. Komponenty tiskárny, které lze koupit (FDM tiskárny)

3D tiskárny jsou z velké části složeny z unifikovaných celků a normalizovaných součástí. Výhodou použití těchto dílů při stavbě tiskárny je jejich nízká cena. Další část tiskárny tvoří rám, který je obvykle složen z profilů a plechů.

#### 2.4.1. Unifikované celky:

- Motory
- Tisková hlava
- Vyhřívaná podložka
- Zdroj
- Řídící jednotka
- Lineární vedení

#### 2.4.2. Normalizované díly:

- Spojovací součástky (šrouby, matky, podložky atd.)
- Ložiska
- Kladky
- Řemeny
- Kabely

## 2.5. Velkoformátový tisk

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) a Big Area Additive Manufacturing (BAAM) jsou dvě nejrozšířenější technologie v oblasti velkoformátového 3D tisku. Cílem BAAM je tisknout co největší modely za co nejkratší čas. Další technologií spadající pod velkoformátový 3D tisk, je tisk z cementových malt využívaný především ve stavebnictví. [12, 13, 20]

### 2.5.1. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) spočívá v navařování jednotlivých vrstev kovu na sebe, dokud se nevytvoří požadovaný tvar výrobku. Výrobu dílů provádí robot, na kterém je připojený svařovací hořák. Rozměr vyráběného dílu je omezen pouze velikostí použitého robota. Technologie WAAM se často používá v kombinaci s třískovým obráběním jako tzv. hybridní výroba. Tuto metodu lze využívat jak pro výrobu nových součástí, tak pro opravu nebo úpravu již existujících dílů. [12, 13, 14]



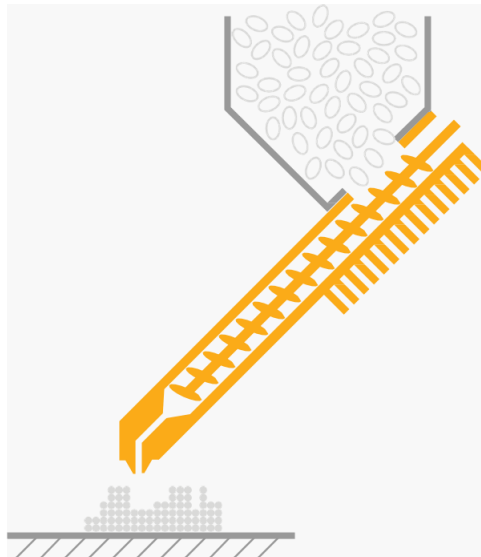
*Obrázek 22 Metoda WAAM [27]*

### 2.5.2. Big Area Additive Manufacturing (BAAM)

Big Area Additive Manufacturing (BAAM) pracuje na stejném principu jako již popsaná technologie tisku FDM. U velkoformátových tiskáren se kromě většího tiskového prostoru setkáme s jinou konstrukcí rámu tiskárny, tiskové hlavy a vyhřívané podložky.

### 2.5.2.1. Tisková hlava

U velkoformátových tiskáren se můžeme setkat se dvěma typy extruderů. Jedním typem je klasický extruder, který se používá u malých FDM tiskáren. Častěji, se ale setkáme s extrudérem pracujícím na technologii PAM (pellet additive manufacturing). Do extruderu je materiál dodáván přes násypku ve formě pelet. Dále je materiál pomocí šneku dopravován do kompresní části extruderu, kde je stlačen a roztaven. Následně roztavený materiál pokračuje skrze trysku ven do prostoru tisku. Výhodou těchto extruderů je větší průtok materiálu, tudíž i rychlejší tisk. Materiál není nutné dodávat ve formě strun, to má za následek snížení nákladů na materiál. [15, 16, 20]

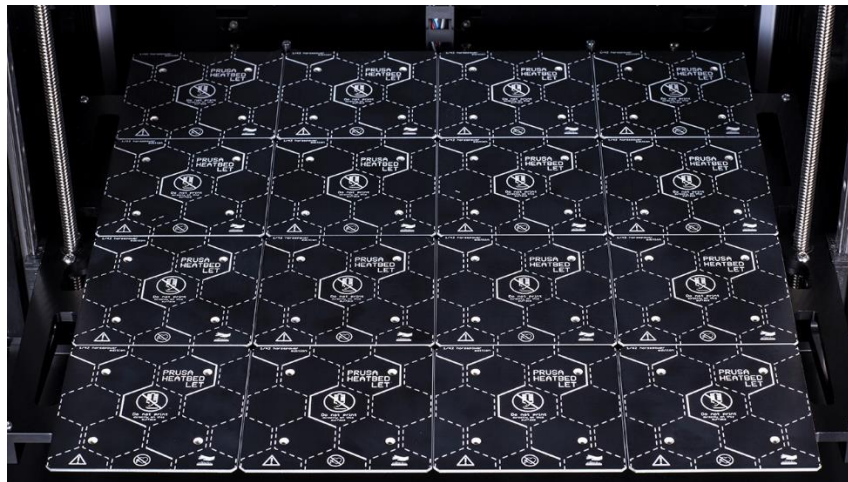


*Obrázek 23 Princip funkce PAM [16]*

### 2.5.2.2. Tiskové podložky

Pro velkoformátové tiskárny je vhodné vyhřívanou podložku rozdelit do několika samostatně řízených menších segmentů. Díky tomuto řešení můžeme vyhřívat jen ty části podložky, které jsou pod tištěným objektem a tím šetřit energii. Problémem velkoformátové podložky je deformace vlivem tepla. Tento problém lze opět řešit rozdělením podložky na menší segmenty, mezi kterými jsou dilatační spáry. Na obrázku [Obrázek 24] je vidět složení podložky z několika samostatných segmentů. [11]





*Obrázek 24 Velkoformátová tisková podložka [11]*

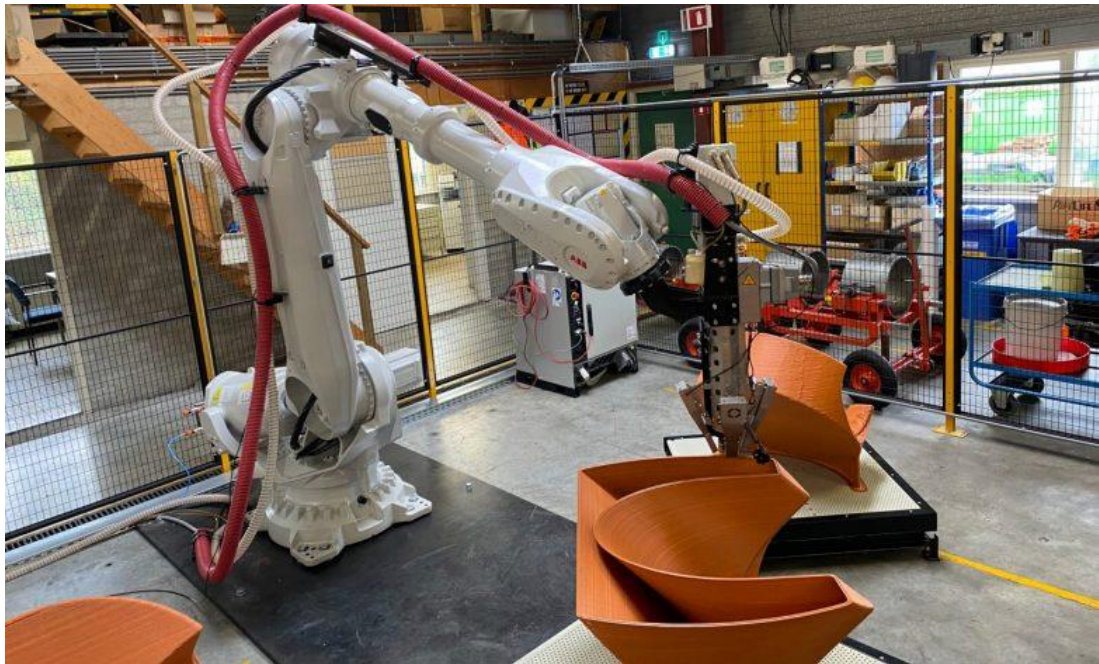
### **2.5.2.3. Rámy velkoformátových tiskáren**

Rám velkoformátové tiskárny se svojí konstrukcí podobá rámu CNC portálové frézky. Výhodou portálové konstrukce je dobrá tuhost s možností dosažení vysokých posuvných rychlostí v osách X a Y. Další méně používanou možností je použití robota, ke kterému je připojen extruder. [13, 20]



*Obrázek 25 Konstrukce portálové tiskárny [26]*





*Obrázek 26 Extruder připojen na robota [17]*

### **2.5.3. 3D tisk ve stavebnictví**

Technologie 3D tisku ve stavebnictví se rozvíjí v řadě oblastí, Velkého posunu dosáhly v tisku zmenšených architektonických modelů. Taktéž se objevují příklady využití v stavební výrobě. Tisknou se hrubé stavby, obkladové a pohledové panely, do interiéru se tisknou atypická svítidla, mobiliáře nebo různé ozdobné prvky.

Jsou využívány dvě základní metody tisku z cementových malt, a to 3D tisk vytlačováním cementové malty a 3D tisk spojováním kameniva. [18, 19]

#### **2.5.3.1. 3D tisk z cementových malt**

Jedná se o nejrozšířenější tiskovou technologii ve stavebnictví, která je obdobou technologie tisku FDM. Kromě cementových malt můžeme pro tisk využívat nepálenou hlínu nebo sklo. Zásadním faktorem při použití této technologie je rychlost tuhnutí materiálu. Materiál musí být po nanesení vrstvy schopný unést sám sebe a být schopný nést následující vrstvy bez deformací. Tento problém se řeší použitím přísad na urychlení tuhnutí. Důležitou roli také hraje doba tisku jedné vrstvy, která je závislá na délce samotné vrstvy a případná pauza mezi jednotlivými vrstvami. Dalším problémem, se kterým se setkáme je tisk šikmých stěn, u kterých jsme limitováni úhlem 45° od svislice. Výhodami této technologie je rychlost tisku (hrubou stavbu můžeme mít vytištěnou za 2 až 3 dny), vyšší homogenita materiálu a bezodpadovost. [18]



*Obrázek 27 3D tisk z cementových malt [18]*

### **2.5.3.2. 3D tisk spojováním kameniva**

Tento způsob tisku se podobá laserovému slinování prášku, spočívá ve sprejování vrstev plniva, kterým je jemnozrný písek a tekutého pojiva, nejčastěji cement nebo polymerní pryskyřice. Celý proces se odehrává v prostorově ohraničené tiskové komoře.

Tisk začíná nanesením malé vrstvy písku v ploše ohraničené tiskovou komorou. Na vrstvu plniva se následně nasprejuje tryskou, nebo soustavou trysek pojivo v místě polohy modelu. Tento proces se opakuje do té doby, dokud není model zcela hotov. Nezpevněné plnivo je využíváno jako podpora pro další vrstvy, to umožňuje tisk téměř libovolného tvaru. Po dokončení tisku se nezpevněný materiál mechanicky odstraněn, nejčastěji je odsán pryč.

Ve srovnání s 3D tiskem z cementových malt je tato technologie pomalejší, ale dokáže tisknout s větší přesností. Velikost tištěných prvků je omezená velikostí a nutností tiskové komory. [18]

### **2.5.4. Konstrukce 3D tiskáren ve stavebnictví**

Konstrukce tiskárny určuje velikost a tvar tiskového prostoru a tím i maximální velikost tisknutého objektu na jednu polohu tiskárny. V současné době se můžeme setkat se třemi základními druhy konstrukce používaných ve stavebnictví. [18]

#### **2.5.4.1. Rámové 3D tiskárny**

Ve stavebnictví používáme dvě rámové konstrukční uspořádání, portálové a delta. Princip těchto konstrukcí již byly popsány u jiných metod tisku. Výhodou rámových tiskáren je její nosnost, tedy i možnost nést těžší extruder. Velikost tiskového prostoru je dána velikostí stroje. Pro případ nárůstu tiskového prostoru výrazně roste i cena, kvůli tomu z hlediska potřebných investic se tato technologie stává dostupná spíše pro velké firmy.



Tiskárny rámové konstrukce jsou především vhodné pro výrobu prefabrikátů ve výrobních halách. [18]



*Obrázek 28 Portálová tiskárna [18]*

#### **2.5.4.2. 3D tiskárny s robotickou rukou**

Extruder je připojen na konec robota podobně jako u technologie WAAM. Tiskový prostor je dán velikostí robota. Oproti rámovým tiskárnám jsou tiskárny s robotickou rukou menší. To se na první pohled může zdát jako nevýhoda, ale robot lze rozšířit o podvozek, nebo posadit na kolejovou dráhu, a tím tiskový prostor výrazně zvětšit. Díky malým rozměrům a hmotnosti robota je tiskárna vhodná pro práce uvnitř budov. [18]



*Obrázek 29 3D tiskárna s robotickou rukou [18]*

### 2.5.4.3. Mobilní 3D tiskárny

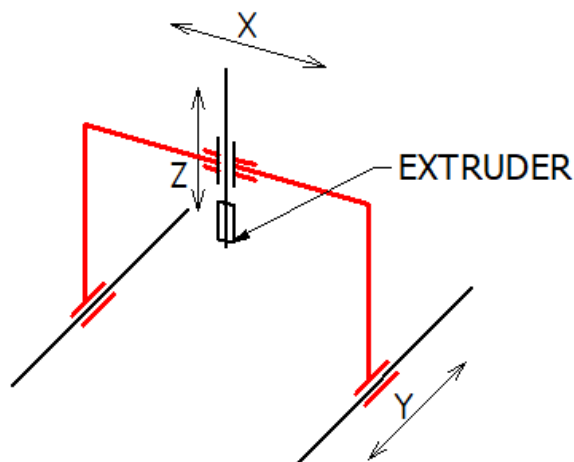
Tento typ tiskáren není pevně spojen se zemí a je schopný přesunu při tisku. Přesun lze realizovat během tisku nebo v kombinaci se stacionární polohou a posunem pouze mezi jednotlivými stanovišti. Přesnost tisku je závislá jak na přesnosti tiskárny, tak na přesnosti polohovacího ústrojí. Výhodou těchto tiskáren je jejich nižší pořizovací cena, nižší hmotnost a tím i menší náklady na přepravu. Mobilní tiskárny limituje přívod tištěného materiálu a menší nosnost tiskárny. [18]



Obrázek 30 Mobilní 3D tiskárna [18]

## 3. Praktická část

V praktické části se budu věnovat koncepčnímu návrhu osy X velkoformátové 3D tiskárny (znázorněna červeně na obrázku [Obrázek 31]), nezbytným návrhovým a kontrolním výpočtům a stručně řešerši zaměřené na stavebnicové prvky firmy Bosch Rexroth.



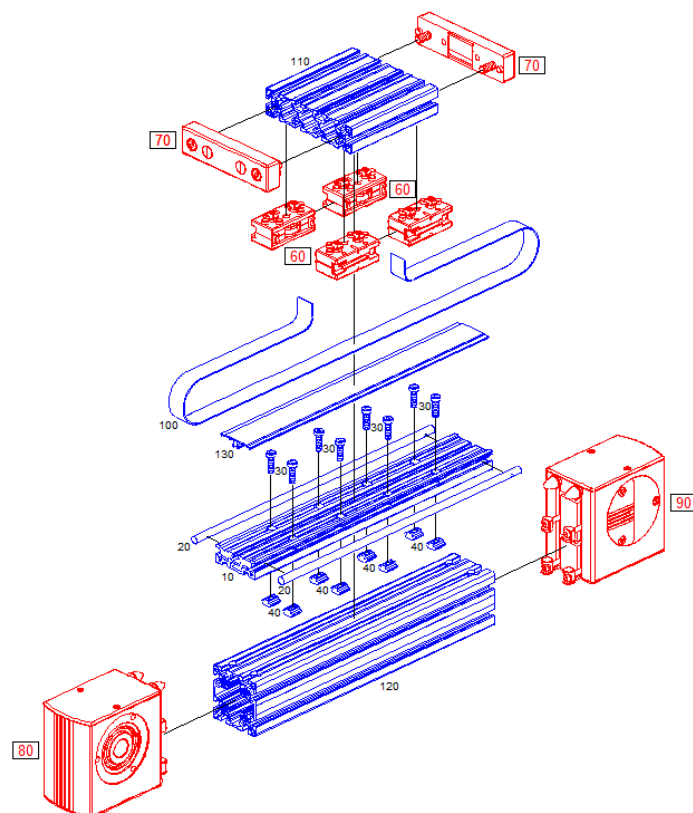
Obrázek 31 Schéma řešené tiskárny [Autor]

### 3.1. Lineární osa

Pro zajištění pohybu extruderu v ose X bude použita lineární osa LF12S od výrobce Bosch Rexroth. Jedná se o lineární řemenový pohon spadající pod stavebnicové systémy hliníkových profilů. Tento typ LO je vhodný pro aplikace, kde vyžadujeme vysokou rychlost pohybu a středního zatížení, zejména pro konstrukce manipulační techniky, podávacích systémů a mnoho dalších. Z těchto důvodů je zvolený typ vhodný i pro navrhovanou 3D tiskárnu.

#### 3.1.1. Konstrukce lineární osy

Lineární osa se skládá z nosného hliníkového profilu, ke kterému je připojen vodící profil obsahující kolejnice ve formě kalených leštěných tyčí kruhového průřezu. Po vodícím profilu jezdí vozík složený z profilu, který je z obou stran zakončen spojkou řemenu a vodícími ložisky. V základní konfiguraci vozík obsahuje čtyři ložiska, ale v případě potřeby vyšší únosnosti je možné vozík rozšířit o další ložiska a tím zvýšit únosnost. Lineární osa je z jedné strany zakončena hlavou pohonu (Drive head), která slouží pro přenos hnacího momentu od motoru na ozubený řemen a z druhé strany je zakončena vratnou hlavou (Return head), jejíž funkce je napínání řemenu. Obě hlavy jsou připojeny přímo k nosnému profilu podélnými koncovými spojkami. Náhon je zajištěn ozubeným řemenem pevně spojeným s vozíkem.



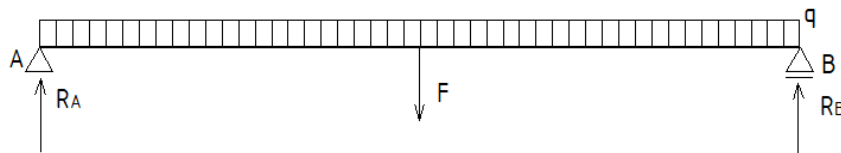
Obrázek 32 Konstrukce lineární osy [34]

### 3.2. Orientační výpočet maximálního zatížení LO

Provedený výpočet slouží k výběru nejvhodnějšího konstrukčního řešení vrchního nosníku portálové konstrukce.

#### 3.2.1. Vztahy pro průhyb

Výpočet byl proveden na zjednodušeném modelu jednoduchého staticky určitého nosníku zatíženého spojitým zatížením  $q$  reprezentujícím vlastní tíhu nosníku a osamělou silou  $F$  ve středu, kde dojde k největšímu průhybu. Osamělá síla  $F$  je zatížení vyvolané tíhou extruderu. Maximální povolený průhyb je 1 mm. Jelikož je skutečný nosník silně staticky přeurlčen bude výsledný průhyb menší než průhyb získaný výpočtem. Respektive možné maximální zatížení bude vyšší než zatížení získané výpočtem. Dále byl ve výpočtu zanedbán vodící profil, který také přispěje k tuhosti nosníku.



Obrázek 33 Nosník [Autor]

Prvním krokem bylo určit reakce v podpoře A a B.

$$q = m \cdot g \tag{1}$$

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} + \frac{g \cdot m \cdot l}{2} \tag{2}$$

Kde	$g$	je tíhové zrychlení	$[m/s^2]$
	$m$	hmotnost nosníku na jeden metr	$[kg/m]$
	$F$	síla	$[N]$
	$l$	délka nosníku	$[m]$

Dalším krokem bylo pomocí Eulerovy metody řezu určit ohybové momenty. Jelikož je nosník symetricky zatížen jsou oba ohybové momenty stejné.

$$M_o(x) = -\frac{g \cdot m \cdot x^2}{2} + R_A \cdot x \tag{3}$$

Po dosazení a úpravě

$$M_o(x) = -\frac{g \cdot m \cdot x^2}{2} + \frac{F \cdot x}{2} + \frac{g \cdot m \cdot l \cdot x}{2} \quad (4)$$

Dále byla zavedena jednotková síla v místě a směru zjišťované deformace. Následně se stejným způsobem jako v předchozím případě určily reakce a ohybové momenty od jednotkového zatížení.

Reakce:

$$r_A = r_B = \frac{1}{2} \quad (5)$$

Ohybový moment od jednotkové síly:

$$m_o(x) = \frac{1}{2}x \quad (6)$$

V dalším kroku se získané ohybové momenty dosadily do Mohrova integrálu (7)

$$v = \frac{1}{EJ} \int_{(l)} M_o(x) \cdot m_o(x) dx \quad (7)$$

Po dosazení a úpravě

$$v = \frac{2}{EJ} \int_0^{\frac{l}{2}} \left( -\frac{g \cdot m \cdot x^3}{4} + \frac{F \cdot x^2}{4} + \frac{g \cdot m \cdot l \cdot x^2}{4} \right) dx \quad (8)$$

Výsledný výraz pro určení posuvu ze, kterého lze následně vyjádřit maximální síla.

$$v = \frac{F \cdot l^3}{48EJ} + \frac{5 \cdot g \cdot m \cdot l^4}{384EJ} \quad (9)$$

$$F_{max} = \frac{48 \cdot v \cdot EJ}{l^3} - \frac{5 \cdot g \cdot m \cdot l}{8} \quad (10)$$

Získaný výraz se shoduje s výrazem, který uvádí výrobce ve svém katalogovém listu.

Kde	E	je modul pružnosti	[N/mm <sup>2</sup> ]
	J	je kvadratický moment	[mm <sup>4</sup> ]
	v	je posuv v ose y	[mm]



### 3.3. Výpočet maximálního zatížení pro jednotlivé verze nosníku

Byly navrženy tři verze, ze kterých se na základě orientačního výpočtu maximálního možného zatížení vybere vhodná varianta.

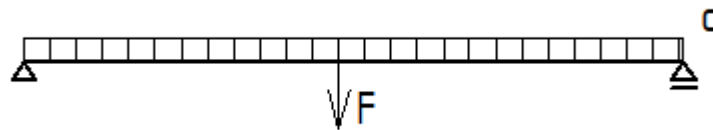
#### 3.3.1. Verze 1

Samostatná lineární osa LF12S bez žádného přidaného profilu



Obrázek 34 Verze 1 [Autor]

Výpočet:



Obrázek 35 Schéma nosníku Verze 1 [Autor]

Pro určení maximálního zatížení použijeme vztah (11).

$$F_{max} = \frac{48 \cdot v \cdot EJ}{l^3} - \frac{5 \cdot g \cdot m \cdot l}{8} \quad (11)$$

$$F_{max} = \frac{48 \cdot 1 \cdot 70000 \cdot 2111000}{3720^3} - \frac{5 \cdot 9,81 \cdot 6,5 \cdot 3,72}{8} \quad (12)$$

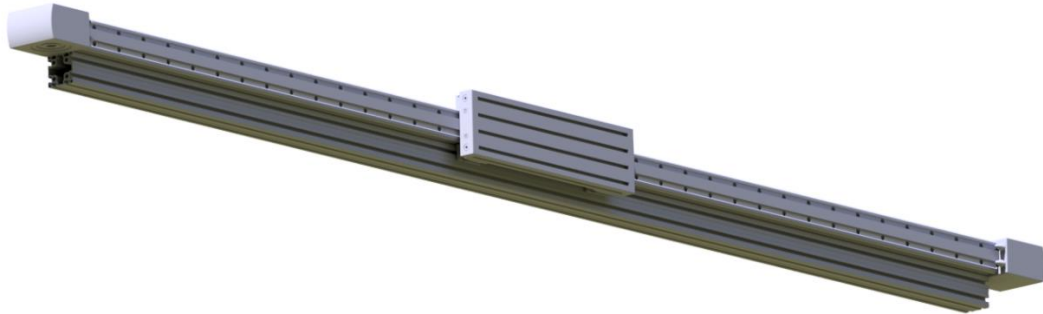
$$F_{max} = -10,5 \text{ N} \quad (13)$$

Z tohoto výsledku vyplývá, že se nosník prohne více jak o 1 mm jen pod vlastní vahou. Tudíž není možné LO použít bez jakékoli výztuhy.



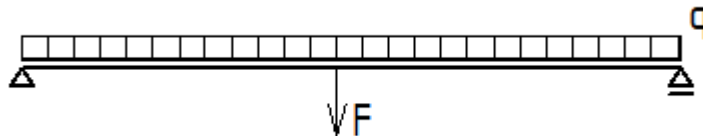
### 3.3.2. Verze 2

Lineární osa LF12S vyztužena přidáním profilu 90x90L. Přidáním profilu docílíme zvýšení kvadratického momentu a tím zvýšení tuhosti nosníku.



Obrázek 36 Verze 2 [Autor]

Výpočet:



Obrázek 37 Schéma nosníku Verze 2 [Autor]

#### 1. Výpočet nového kvadratického momentu

Pro výpočet kvadratického momentu byla využita Steinerova věta (14).

$$J_1 = \sum (J + A \cdot c^2) \quad (14)$$

Kde	J	je kvadratický moment	[mm <sup>4</sup> ]
	A	je plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
	c	je vzdálenost os	[mm]

$$J_1 = 2 \cdot (2111000 + 2410 + 45^2) = 13982500 \text{ mm}^4 \quad (15)$$

#### 2. Výpočet maximálního zatížení

$$F_{max} = \frac{48 \cdot v \cdot EJ}{l^3} - \frac{5 \cdot g \cdot 2m \cdot l}{8} \quad (16)$$

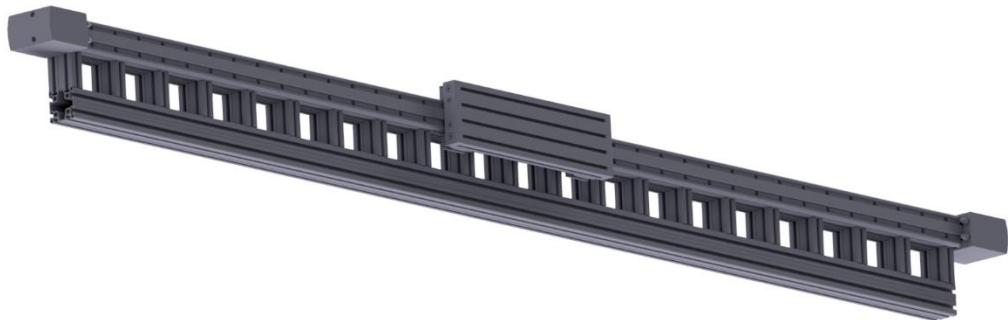
$$F_{max} = \frac{48 \cdot 1 \cdot 70000 \cdot 13982500}{3720^3} - \frac{2 \cdot 5 \cdot 9,81 \cdot 6,5 \cdot 3,72}{8} \quad (17)$$

$$F_{max} = 610,35 \text{ N} \quad (18)$$

Takto navržený nosník unese extruder o maximální hmotnosti 61 kg.

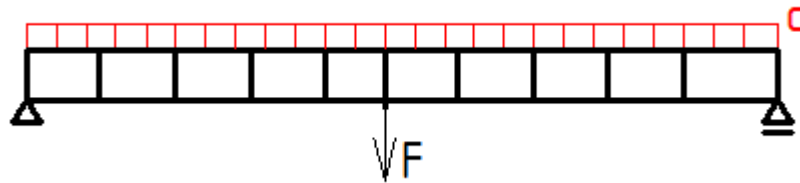
### 3.3.3. Verze 3

Lineární osa vyztužená prutovou soustavou. Horní pás je tvořen nosným profilem LO. Spodní pás je z profilu 90x90L. Výplň je tvořena ze svislých prutů z profilu 45x90. Pro výpočet byla prutová soustava zjednodušena na jeden nosník s danou průřezovou charakteristikou. Zvětšením vzdálenosti mezi profily 90x90L zvýšíme kvadratický moment nosníku a tím i jeho tuhost. Příčky ve výpočtu nebyly uvažovány. Tímto zjednodušením snižujeme tuhost a můžeme předpokládat vyšší finální tuhost nosníku a možnost vyššího zatížení, než který získáme výpočtem. Postup výpočtu byl stejný jako u verze 2.



Obrázek 38 Verze 3 [Autor]

Výpočet:



Obrázek 39 Schéma nosníku Verze 3 [Autor]

1. Výpočet nového kvadratického momentu

$$J_2 = \sum (J + A \cdot c^2) \quad (19)$$

$$J_2 = 2 \cdot (2111000 + 2410 + 95^2) = 47722500 \text{ mm}^4 \quad (20)$$

2. Výpočet maximálního zatížení

$$F_{max} = \frac{48 \cdot v \cdot EJ}{l^3} - \frac{5 \cdot g \cdot 2m \cdot l}{8} \quad (21)$$

$$F_{max} = \frac{48 \cdot 1 \cdot 70000 \cdot 47722500}{3720^3} - \frac{2 \cdot 5 \cdot 9,81 \cdot 6,5 \cdot 3,72}{8} \quad (22)$$

$$F_{max} = 2812,55 \text{ N} \quad (23)$$

Takto navržený nosník unese extruder o maximální hmotnosti 281 kg.

### 3.3.4. Výběr nejvhodnější verze

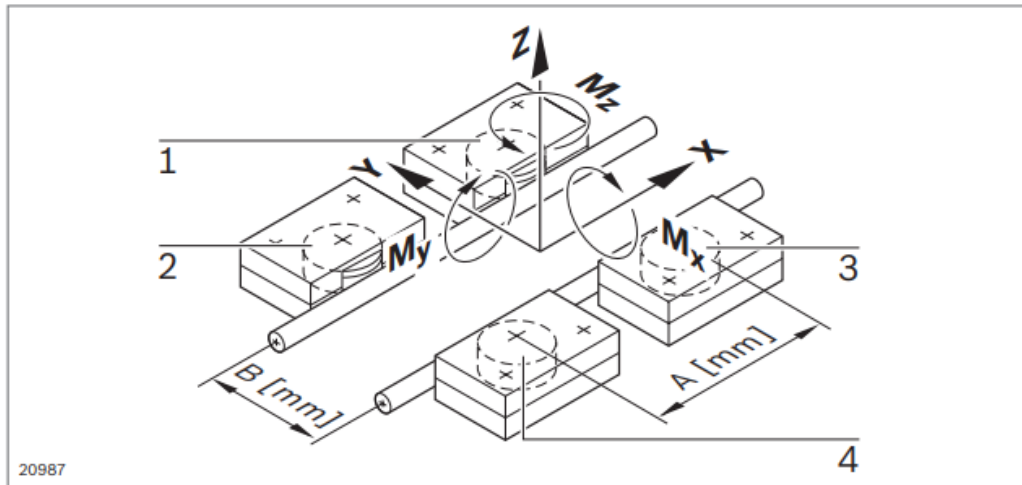
Na základě provedených výpočtů byla zvolena verze 3. Z výpočtů vyplývá, že zvětšením vzdálenosti mezi horním a spodním pásem zvýšíme tuhost nosníku. S tímto poznatkem je možné pracovat při následujících návrzích tiskárny a v případě potřeby vyšší tuhosti je možné zmiňovanou vzdálenost zvětšit. Výpočet byl zjednodušen pouze na ohyb, ale ve skutečnosti bude portál namáhán na kombinaci ohybu a krutu. Namáhání krutem vznikne uložením extruderu mimo osu nosníku. V současné době neznáme konstrukční řešení extruderu a z tohoto důvodu není možné provádět přesný výpočet namáhání nosníku. Nicméně v následujících fázích návrhů a výpočtů se namáhání krutem nesmí zanedbat. V případě, že by namáhání krutem bylo příliš veliké, je možné upravit konstrukci například přidáním protizávaží, které by bylo uloženo naproti extruderu pro snížení momentu, nebo přidáním lineárního vedení.

Verze	$F_{max}$ [N]
1	-10,5
2	610,35
3	2812,55

*Tabulka 1 Tabulka výsledků průhybu*

### 3.4. Výpočet zatížení ložisek vozíku

Výpočet byl proveden podle vztahů uvedených v katalogu výrobce.[33] Byla zvolena hmotnost extruderu 50 kg s těžištěm umístěným ve vzdálenosti 100 mm od vozíku v ose Z. Opět se jedná o orientační výpočet, jelikož neznáme konstrukci extruderu, proto nemůžeme zatížení a životnost ložisek přesně určit. Nicméně postup výpočtu a použité vztahy zůstanou stejné. Z tohoto důvodu je tento výpočet v práci uveden.



Cam roller 1:

$$F_r = -\left(\frac{F_y}{2}\right) - \left(\frac{M_z}{A}\right)$$

$$F_a = \left(\frac{F_z}{4}\right) + \left(\frac{M_x}{2 \cdot B}\right) - \left(\frac{M_y}{2 \cdot A}\right)$$

Cam roller 3:

$$F_r = +\left(\frac{F_y}{2}\right) + \left(\frac{M_z}{A}\right)$$

$$F_a = \left(\frac{F_z}{4}\right) - \left(\frac{M_x}{2 \cdot B}\right) - \left(\frac{M_y}{2 \cdot A}\right)$$

Cam roller 2:

$$F_r = -\left(\frac{F_y}{2}\right) + \left(\frac{M_z}{A}\right)$$

$$F_a = \left(\frac{F_z}{4}\right) + \left(\frac{M_x}{2 \cdot B}\right) + \left(\frac{M_y}{2 \cdot A}\right)$$

Cam roller 4:

$$F_r = +\left(\frac{F_y}{2}\right) - \left(\frac{M_z}{A}\right)$$

$$F_a = \left(\frac{F_z}{4}\right) - \left(\frac{M_x}{2 \cdot B}\right) + \left(\frac{M_y}{2 \cdot A}\right)$$

Obrázek 40 Vztahy pro výpočet ložisek [33]

Kde	A	je vzdálenost mezi ložisky	[mm]
	B	je vzdálenost mezi kolejnicemi	[mm]
	$F_r$	síla v radiálním směru	[N]
	$F_a$	síla v axiálním směru	[N]

### 3.4.1. Určení sil a momentů

Určení sil a momentů působící na vozík v jednotlivých osách.

$$F_x = F_z = m \cdot a \tag{24}$$

$$F_x = F_y = 50 \cdot 3 = 150 \text{ N} \tag{25}$$

$$-F_y = m \cdot g \tag{26}$$

$$F_y = -50 \cdot 9,81 = -490,5 \text{ N} \quad (27)$$

$$M_x = -F_y \cdot e \quad (28)$$

$$M_x = 490,5 \cdot 100 = 49050 \text{ Nmm} \quad (29)$$

$$M_y = F_x \cdot e \quad (30)$$

$$M_y = 150 \cdot 100 = 15000 \text{ Nmm} \quad (31)$$

$$M_z = 0 \text{ Nmm} \quad (32)$$

Kde	m	je hmotnost extruderu	[kg]
	a	je zrychlení vozíku	[m/s <sup>2</sup> ]
	g	je tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
	e	je vzdálenost těžiště od vozíku	[mm]

### 3.4.2. Zatížení jednotlivých ložisek

Výpočet je ukázán na ložisku č.1. Zbylá ložiska se spočítají stejným způsobem a výsledky jsou uvedeny v tabulce [Tabulka 3].

Radiální síla:

$$F_r = -\left(\frac{F_y}{2}\right) - \left(\frac{M_z}{A}\right) \quad (33)$$

$$F_r = \left(\frac{-490,5}{2}\right) - \left(\frac{0}{520}\right) = 245,25 \text{ N} \quad (34)$$

Axiální síla:

$$F_a = \left(\frac{F_z}{2}\right) + \left(\frac{M_x}{2 \cdot B}\right) - \left(\frac{M_y}{2 \cdot A}\right) \quad (35)$$

$$F_a = \left(\frac{150}{2}\right) + \left(\frac{49050}{2 \cdot 78}\right) - \left(\frac{15000}{2 \cdot 520}\right) = 337,5 \text{ N} \quad (36)$$

Ekvivalentní dynamické zatížení:

$$P_1 = x \cdot |F_r| + y \cdot |F_a| \quad (37)$$

$$P_1 = 0,5 \cdot 245,25 + 4,7 \cdot 337,5 = 1708,88 \text{ N} \quad (38)$$

Ekvivalentní statické zatížení:

$$P_{01} = x_0 \cdot |F_r| + y_0 \cdot |F_a| \quad (39)$$

$$P_{01} = 1 \cdot 245,25 + 5,4 \cdot 337,5 = 2067,75 \text{ N} \quad (40)$$

Kde  $x, x_0, y, y_0$  jsou konstanty z katalogu výrobce [1]

	Load case: $F_r \geq  F_a $				Load case: $F_r <  F_a $			
	x	y	$x_0$	$y_0$	x	y	$x_0$	$y_0$
<b>LF6</b>	1	3.1	1.2	3.5	0.5	3.6	1	3.7
<b>LF12</b>	1	4.2	1.2	5.2	0.5	4.7	1	5.4
<b>LF20</b>	1	4	1.2	4.9	0.5	4.5	1.1	5

Tabulka 2 Tabulka konstant [33]

Tabulka výsledků:

č.	Ložisko	$F_a$ [N]	$F_r$ [N]	P [N]	$P_0$ [N]
1		337,5	245,25	1708,8	2067,75
2		366,35	245,25	1844,4	2223,5
3		291,35	245,25	1491,9	1818,5
4		-262,5	245,25	1356,3	1662,7

Tabulka 3 Tabulka výsledků

Statická bezpečnost

$$P_0 = \max(P_{01}, P_{02}, P_{03}, P_{04}) = 2226,63 \text{ N} \quad (41)$$

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{5000}{2223,51} = 2,25$$

Dle výrobce je doporučená statická bezpečnost  $S_0 > 4$ . Zvýšením počtu ložisek na dvojnásobek zvýšíme 2x i statickou bezpečnost.

(42)

Kde  $C_0$  je statická únosnost ložisek [N]

$S_0$  je statická bezpečnost [1]

### 3.4.3. Životnost ložisek

Životností ložisek určíme dobu, po které je nutná oprava či výměna ložiska.

$$P = \max(P_1, P_2, P_3, P_4) = 1844,45 \text{ N} \quad (43)$$

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 10^5 = \left(\frac{8300}{1844,45}\right)^3 \cdot 10^5 = 9072318,52 \text{ m} \quad (44)$$

$$L_h = \left(\frac{L}{2 \cdot s \cdot n_s \cdot 60}\right) = \left(\frac{9072318,52}{2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 60}\right) \cong 8440 \text{ hod}$$

Kde  $s$  je délka zdvihu [m]  
 $C$  je dynamická únosnost ložisek [N]  
 $n_s$  zdvihová frekvence [ $\text{min}^{-1}$ ]

Trvanlivost ložisek vozíku je 8400 hodin s 90% spolehlivostí. Při běžném používání se dá předpokládat vyšší životnost ložisek, popřípadě přidáním ložisek na vozík zvýšíme životnost ložisek.

(45)

#### 3.4.4. Únosnost vozíku LO

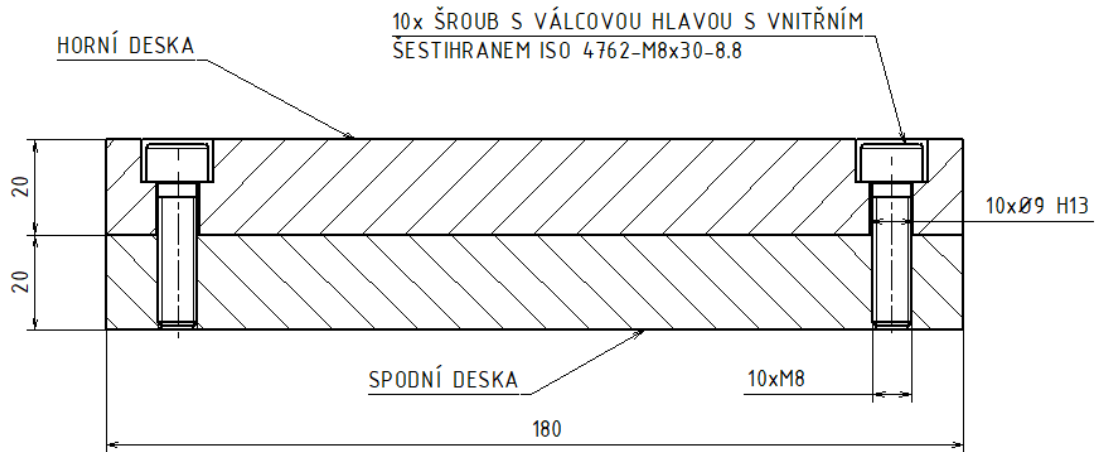
Vozíky mají v každé ose omezenou únosnost. Při potřebě tuto únosnost zvýšit je možné, pokud to konstrukce dovoluje, změnit orientaci vozíku, nebo přidat ložiska. Únosnost vozíku LO LH12S je uvedena v tabulce.

Počet ložisek	$F_z$ [N]	$F_y$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
4	2000	3500	78	520	884
6	3000	5250	117	-	-
8	4000	7000	156	-	-

*Tabulka 4 Únosnost vozíku*

#### 3.5. Výpočet šroubového spoje

Kontrolní výpočet navrženého šroubového spoje mezi horní a spodní deskou nohy portálu. Pro spoj byly zvoleny šrouby ISO 4762 - M8x30-8.8.



Obrázek 41 Šroubový spoj [Autor]

V prvním kroku je potřeba určit sílu, kterou musí šroubový spoj být schopný přenést. Sílu určíme ze vztahu (46).

$$F = \frac{m_p}{2} \cdot a = \frac{160}{2} \cdot 15 = 1200 \text{ N} \quad (46)$$

Kde  $m$  je hmotnost portálu [kg]  
 $a$  je maximální zrychlení LO [m/s<sup>2</sup>]

Dále musíme určit montážní přepětí

$$Q \geq \frac{F \cdot k}{f} \quad (47)$$

$$Q \geq \frac{1200 \cdot 1,5}{0,1} = 18000 \text{ N} \quad (48)$$

Kde  $F$  síla, kterou musí spoj přenést [N]  
 $k$  bezpečnost spoje [1]  
 $f$  součinitel tření [1]  
 $Q$  montážní přepětí [N]

Montážní přepětí pro jednotlivé šrouby

$$Q_0 = \frac{Q}{i} = \frac{18000}{10} = 1800 \text{ N} \quad (49)$$

Kde  $i$  je počet šroubů [1]

Kontrolní výpočty pro zvolený počet šroubů  $i$



Úhel stoupání

$$\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{1,25}{\pi \cdot 7,188}\right) = 3,17^\circ \quad (50)$$

Kde  $P$  stoupání závitu [mm]  
 $d_2$  střední průměr závitu [mm]

Úhel boku profilu

$$\beta_n = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \beta \cdot \cos \gamma) = \operatorname{tg}^{-1}(\operatorname{tg} 30 \cdot \cos 3,17) = 29,96^\circ \quad (51)$$

Třecí úhel

$$\varphi' = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{f_z}{\cos \beta_n}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{0,13}{\cos 29,96}\right) = 8,53^\circ \quad (52)$$

Kde  $f_z$  součinitel tření závitu [1]

Napětí od namáhání v tahu

$$\sigma_{tš} = \frac{Q_0}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{1800}{\frac{\pi \cdot 6,466^2}{4}} = 54,81 \operatorname{Nmm}^{-2} \quad (53)$$

Kde  $d_3$  je malý průměr závitu [mm]

Při utahování je jádro šroubu kromě tahu, namáhán kroučícím momentem. Velikost kroučícího momentu určíme ze vztahu. [32]

$$M_{kš} = Q_0 \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') = 1800 \cdot \frac{7,188}{2} \cdot \operatorname{tg}(3,17 + 8,53) = 1339,71 \operatorname{Nmm} \quad (54)$$

Průřezový modul v krutu

$$W_{kš} = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} = \frac{\pi \cdot 6,466^3}{16} = 51,1 \operatorname{mm}^3 \quad (55)$$

Kroučící moment vyvolá smykové napětí

$$\tau = \frac{M_{kš}}{W_{kš}} = \frac{1339,71}{51,1} = 26,22 \text{ Nmm}^{-2} \quad (56)$$

Redukované napětí

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{tš}^2 + \alpha^2 \cdot \tau^2} = \sqrt{54,81^2 + \sqrt{3}^2 \cdot 26,22^2} = 71,18 \text{ Nmm}^{-2} \quad (57)$$

Kde  $\alpha$  konstanta dle Energetické hypotézy [1]

Bezpečnost

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{kt}}{\sigma_{red}} = \frac{640}{71,18} = 8,99 \geq 1,2 \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (58)$$

### 3.5.1. Kontrola tlaku v dosedací ploše pod šroubem

Dovolený tlak v dosedací ploše je 100-120 Nmm<sup>-2</sup>

$$R_{1H} = \frac{D_1}{2} = \frac{9}{2} = 4,5 \text{ mm} \quad (59)$$

$$R_{2H} = \frac{e_{š}}{2} = \frac{13}{2} = 6,5 \text{ mm} \quad (60)$$

$$p_{hš} = \frac{Q_o}{\pi * (R_{2H}^2 - R_{1H}^2)} \leq p_{DM(H)} \quad (61)$$

$$p_{hš} = \frac{1800}{\pi * (6,5^2 - 4,5^2)} \leq 100 \quad (62)$$

$$p_{hš} = 26,04 \text{ MPa} \leq 100 \text{ Nmm}^{-2} \Rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (63)$$

Kde  $D_1$  je průměr díry pro šroub [mm]

Kde  $e$  je průměr hlavy šroubu [mm]

### Kontrola tlaku v závitu

Dovolený tlak v závitu pro hliníkovou matici je  $20 \text{ Nmm}^{-2}$

$$z_T = \frac{m_m}{P} = \frac{16}{1,25} = 12,8 \rightarrow 12 \quad (64)$$

$$p_z = \frac{Q_o}{\frac{\pi}{4}(d^2 - D_1^2) \cdot z_T} \leq p_{Dz} \quad (65)$$

$$p_z = \frac{1800}{\frac{\pi}{4} \cdot (8^2 - 6,647^2) \cdot 12} = 9,64 \leq 20 \text{ Vyhovuje} \quad (66)$$

Kde	$z_T$	je počet závitů v matici	[1]
	$d$	je velký průměr závitu šroubu	[mm]
	$D_1$	malý průměr matice	[mm]
	$m$	výška matice	[mm]

### 3.5.2. Stanovení potřebného utahovacího momentu na klíči pro 1 šroub s respektováním třecího momentu pod hlavou šroubu

Součtem třecího momentu pod hlavou šroubu a kroutícího momentu získáme výsledný utahovací moment.

$$M_{Tš} = \frac{Q_o \cdot f_s \cdot \frac{s + D_1}{2}}{2} = \frac{1800 \cdot 0,12 \cdot \left(\frac{13 + 9}{2}\right)}{2} = 1188 \text{ Nmm} \quad (67)$$

$$M_{KK} = M_{Kš} + M_{Tš} = 1339,71 + 1188 = 2527,71 \text{ Nmm} \quad (68)$$

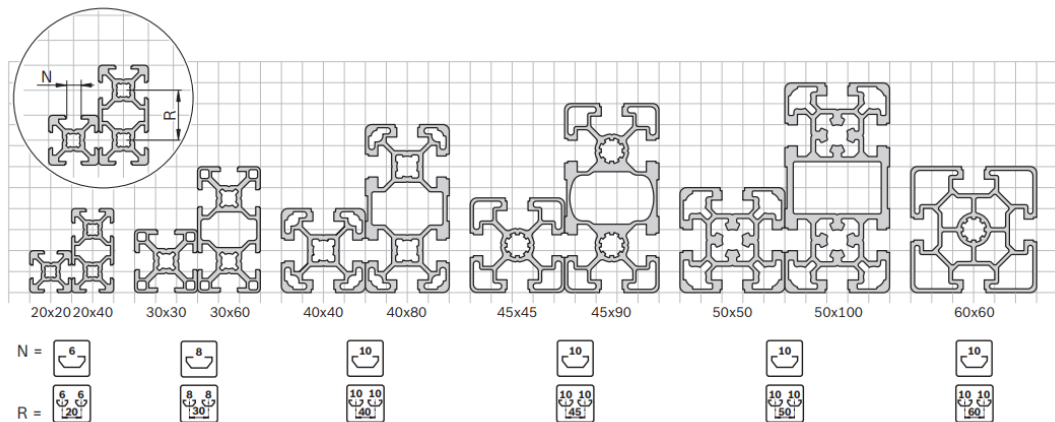
### 3.6. Stavebnicový systém Bosch Rexroth

Bosch dodává v oblasti montážní techniky produkty od hliníkových profilů až po dopravníkové systémy pro plně automatizované výrobní linky. Mezi ně spadá i námi používaná lineární osa. Profily jsou vyráběny ze slitiny hliníku v několika rozměrových řadách s různými tvary průřezu. Profily obsahují drážky, do kterých zapadají části spojovacích součástí, panelových prvků, kol atd.. Též již zmiňovaná lineární osa je složena z profilů.

#### 3.6.1. Hliníkové profily

Profily od firmy Bosch Rexroth jsou vyrobeny ze slitiny hliníku EN AW – Al MgSi v několika velikostních řadách. Maximální délka většiny profilů je 6000 mm, u malých rozměrů profilu je maximální délka 3000 mm. V profilech jsou zhotoveny podélné drážky o

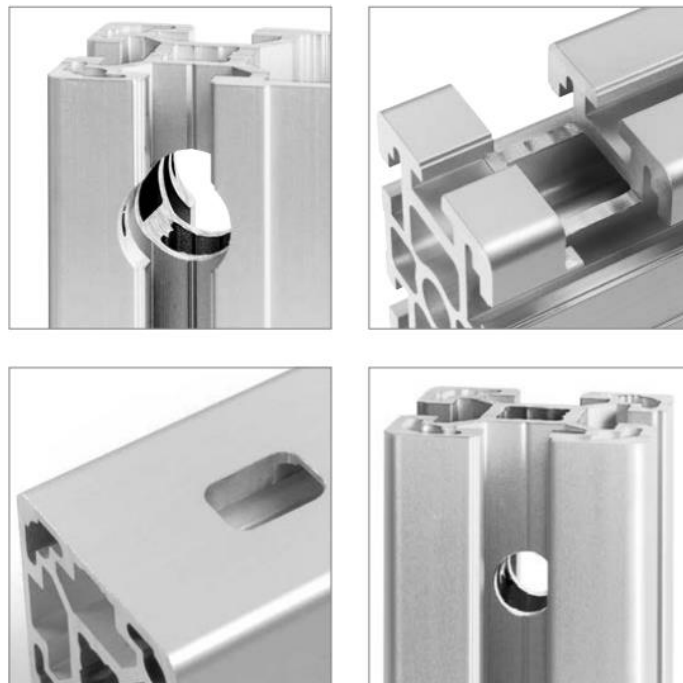
velikosti 6, 8 nebo 10 mm v závislosti na velikosti profilu. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, drážky slouží ke spojování profilů, nebo k připojování celé řady komponentů spadající pod stavebnicové systémy firmy Bosch Rexroth. [30]



*Obrázek 42 Průřezy hliníkových profilů [30]*

### 3.6.1.1. Obrábění profilů

Obrábění profilů je vyžadováno pro velkou řadu typů spojení. Rexroth nabízí celou řadu možností spojování profilů, kdy většina z nich vyžaduje určité úpravy profilu. Jedná se o vrtání otvorů, řezání na požadovanou délku, frézování drážek a úkosů pro spojování profilů pod úhlem. [30]



*Obrázek 43 Obrábění profilů [30]*

### 3.6.2. Spojovací prvky

V následující kapitole se budeme věnovat spojovacím prvkům využívaných ke spojování profilů stavebnicových konstrukcí.

#### 3.6.2.1. Přírubová matice a T-šroub

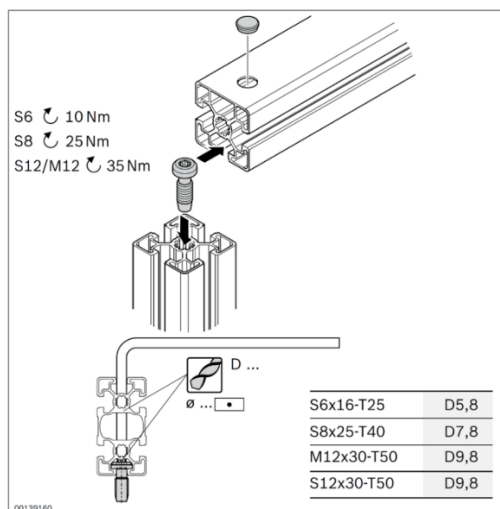
Jedná se o jednoduchý, spolehlivý a levný spojovací prvek. Šroub s T hlavou pasuje do drážky v profilu. Šroub je na konci opatřen zářezem, který značí polohu šroubu. Výhodou je, že není potřeba žádné obrábění.



Obrázek 44 Přírubová matice a T-šroub [31]

#### 3.6.2.2. Centrální šroub (Central bolt)

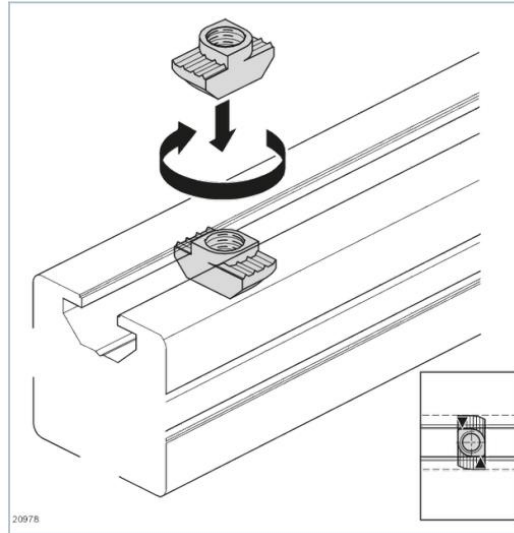
Centrální šroub je levný spojovací prvek. Šroub je vyráběn ve dvou variantách se značením S a M. Šrouby řady M jsou klasické šrouby s metrickým závitem s nutností do profilu vyřezat závit. Šrouby z řady S jsou samovrtací a není třeba do profilu řezat závit. Před montáží je nutné do profilu vyvrtat otvor pro klíč.



Obrázek 45 Centrální šroub [31]

### 3.6.2.3. T-matice

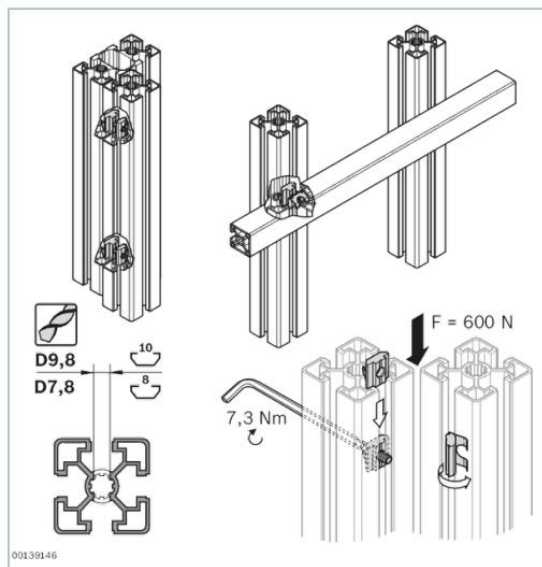
Jde o matici ve tvaru drážky profilu. Matice jsou vyrobeny z nerezové oceli, proto je vhodná i pro venkovní použití. Stejně jako u T-šroubu není nutné obrábění. Montáž matice je patrná z obrázku [Obrázek 46]



Obrázek 46 T-matice [31]

### 3.6.2.4. Paralelní spojka

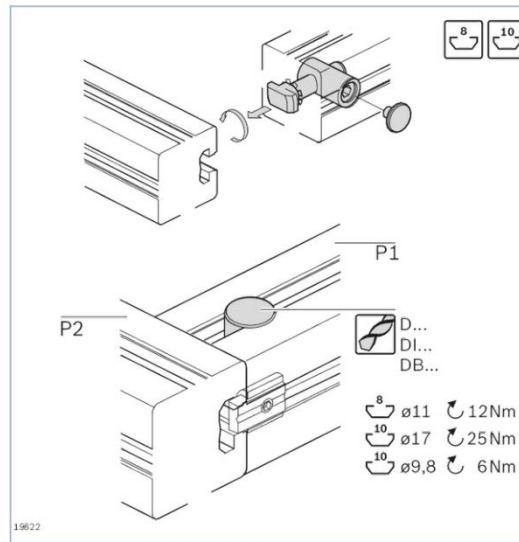
Paralelní spojka se používá ke spojování dvou profilů bez mezery. Spojka je složena ze dvou posuvných bloků, ke kterým jsou přivařeny pružiny pro jednoduchou montáž. V místě, kam chceme spojku uložit je třeba vyvrtat otvor pro imbusový klíč. Možnosti použití a montáž je patrná z obrázku [Obrázek 47]. Sérii těchto paralelních spojek by se dal realizovat spoj mezi LO a profilu ve verzi 2.



Obrázek 47 Paralelní spojka [31]

### 3.6.2.5. Rychlospojka

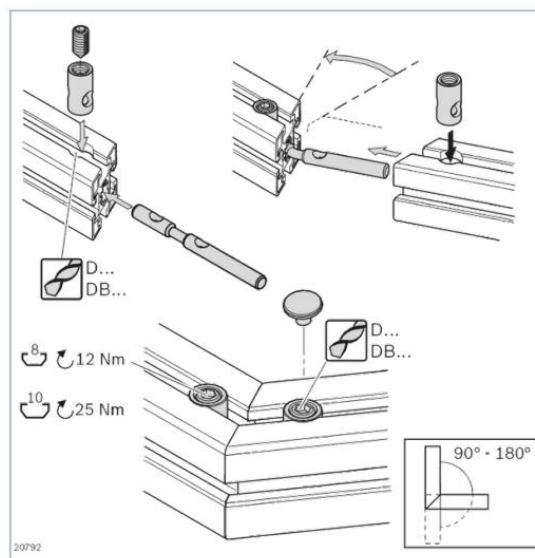
Rychlospojky této konstrukce se používají pro spojování profilů pod pravým úhlem. Rychlospojka se skládá z dříku a trubky opatřené stavěcím šroubem. Dřík je z jedné strany opatřen T hlavou, která se vkládá do drážky profilu v místě spoje a druhý konec je prostrčen skrze trubku uloženou v druhém profilu. Do dříku je v místě dutiny trubky vytvořeno kuželové vybrání, do kterého je tlačěn stavěcí šroub. Utahováním šroubu vzniká napětí v dříku a tím dochází k utažení spoje. Rychlospojky vyžadují přesně vyvrtaný otvor pro umístění válce.



Obrázek 48 Rychlospojka [31]

### 3.6.2.6. Ohebná rychlospojka end-to-end

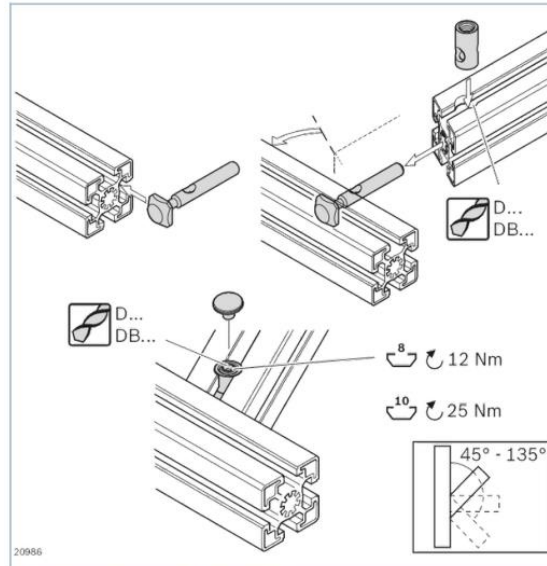
Tato rychlospojka se používá k spojování profilů na jejich koncích. Dřík je v místě spoje zúžen a je možné ho ohnout do požadovaného úhlu. Princip funkce je stejný jako u předchozí rychlospojky. Montáž a možnost použití je vidět na obrázku [Obrázek 49].



Obrázek 49 Rychlospojka end-to-end [31]

### 3.6.2.7. Ohebná rychlospojka end-to-slot

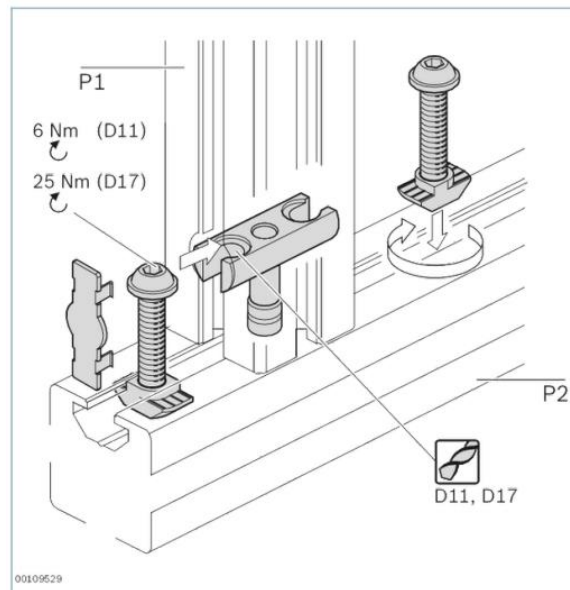
Stejná rychlospojka jako již popsaná pro spoje s pravým úhlem. Jediný rozdíl je zúžený dřík v místě spoje, který jeho ohnutím umožňuje spojení profilů pod úhlem v rozmezí 45° až 135°.



Obrázek 50 Rychlospojka end-to-slot [31]

### 3.6.2.8. Svorníková spojka

Využívá se pro spojování profilů kolmých na sebe. Šroubová spojka je určena na přenos vysokého zatížení. Spojka se skládá ze dvou T-šroubů, matic, plechu, ve kterém jsou drážky pro šrouby s maticí, vzpěry připojené k plechu a krytek. Do profilu je před montáží nutné vyvrtat otvor.

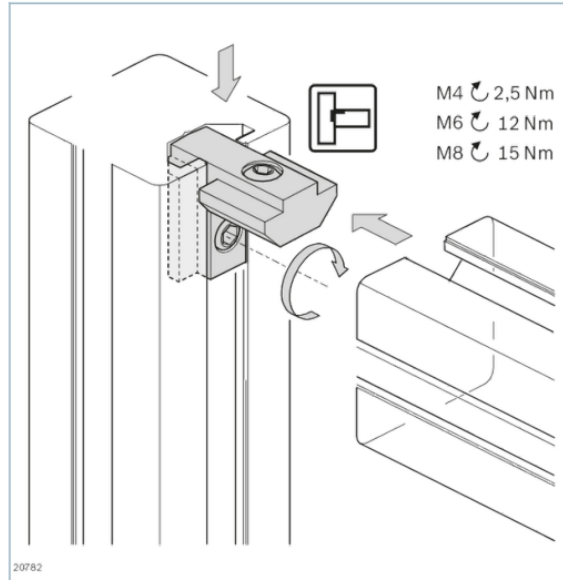


Obrázek 51 Svorníková spojka [31]



### 3.6.2.9. Vnitřní držák (Inner bracket)

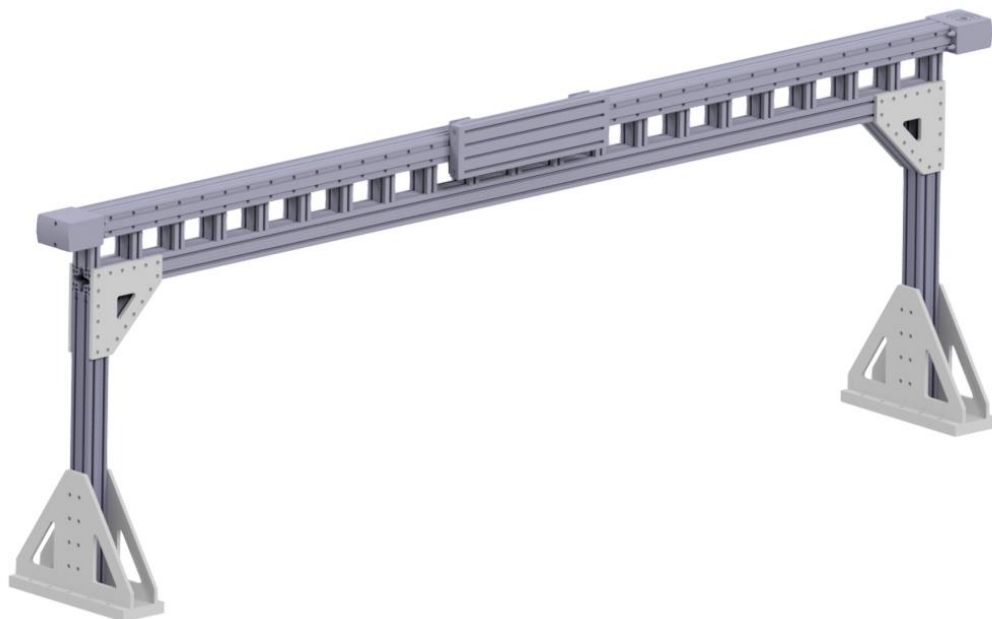
Jednoduchý způsob spojování profilů pod pravým úhlem. Vnitřní držák je vhodný pro konstrukce rámu, mříží nebo příček. Výhodou je, že není vyžadováno žádné obrábění a jednoduchá montáž.



*Obrázek 52 Inner bracket [31]*

## 3.7. Konstrukční řešení osy X

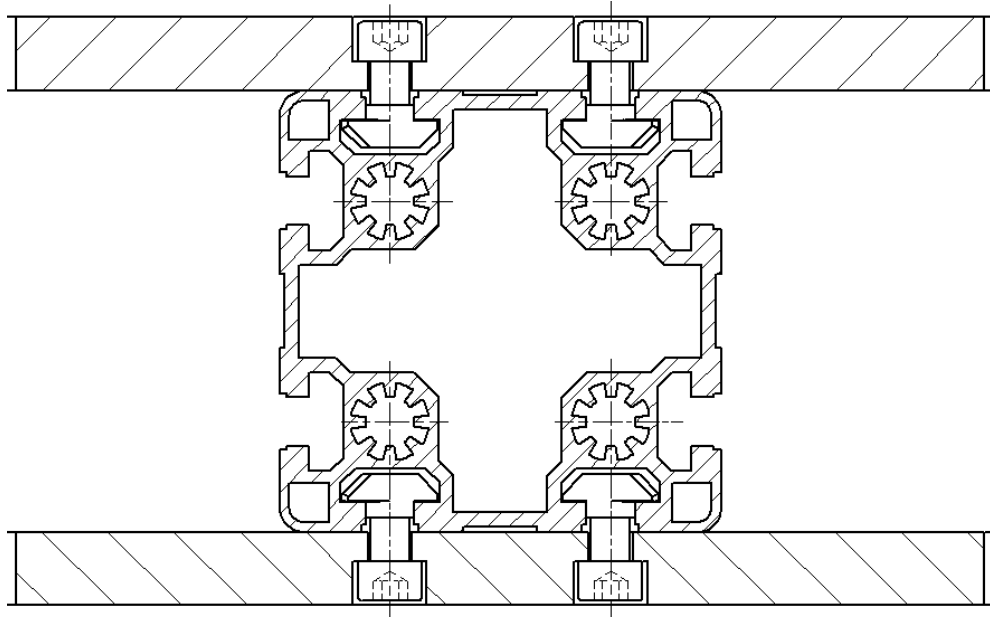
V následující kapitole je popsán koncepční návrh konstrukce osy X velkoformátové 3D tiskárny. Osa je řešena jako portálová konstrukce složená z hliníkových profilů stavebnicové konstrukce.



*Obrázek 53 Konstrukce osy X [Autor]*

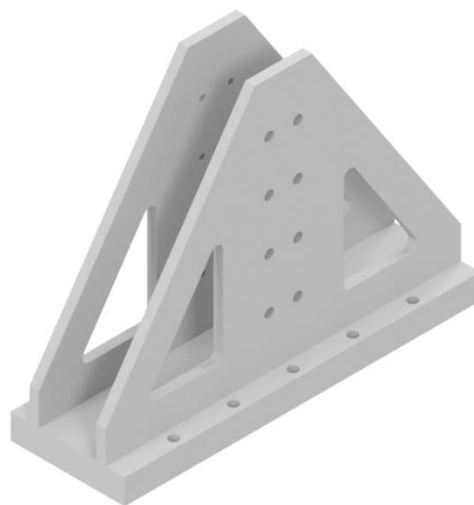
### 3.7.1. Nohy portálu

Nohy portálu se skládají z profilu 90x90L a patek. Spojení profilu a patky je realizováno pomocí šroubů ISO 4762 - M8x18-8.8 a T-matic M8.



*Obrázek 54 Spoj mezi nohou a patkou [Autor]*

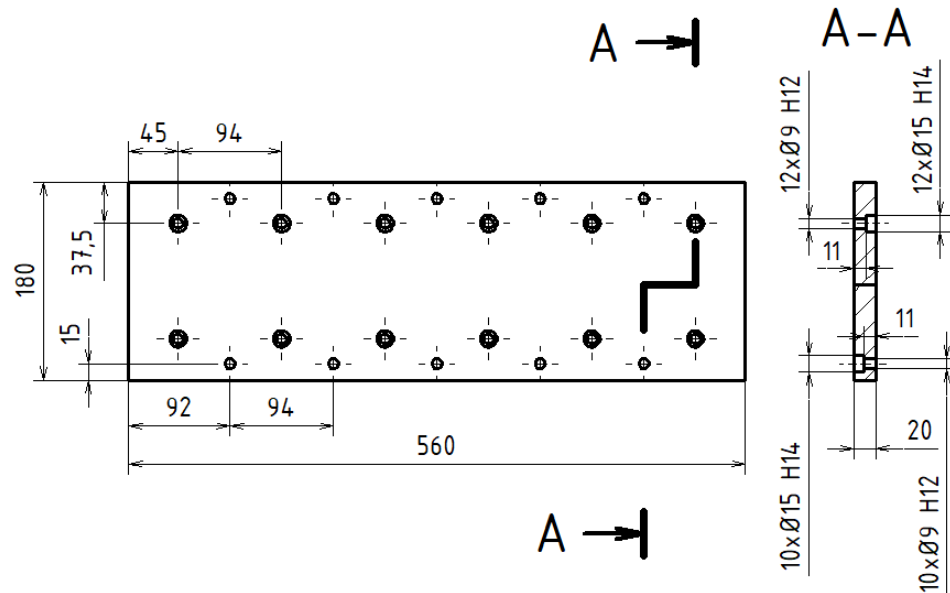
Patky se skládají ze dvou hliníkových desek, které jsou spojeny šrouby ISO 4762 - M8x30-8.8 a dvou žeber přišroubovanými k horní desce stejnými šrouby. K žebrům je pak připojen profil již popsaným způsobem, který je znázorněn na obrázku [Obrázek 54]. Dvě desky byly zvoleny kvůli lepšímu rozmístění šroubů, jelikož máme konstrukci vozíku LO dané, kam můžeme šrouby umístit. V případě použití pouze jedné desky by se křížila pozice žeber s polohou šroubů potřebných k uchycení patky k LO.



*Obrázek 55 Patka [Autor]*

### 3.7.1.1. Horní deska

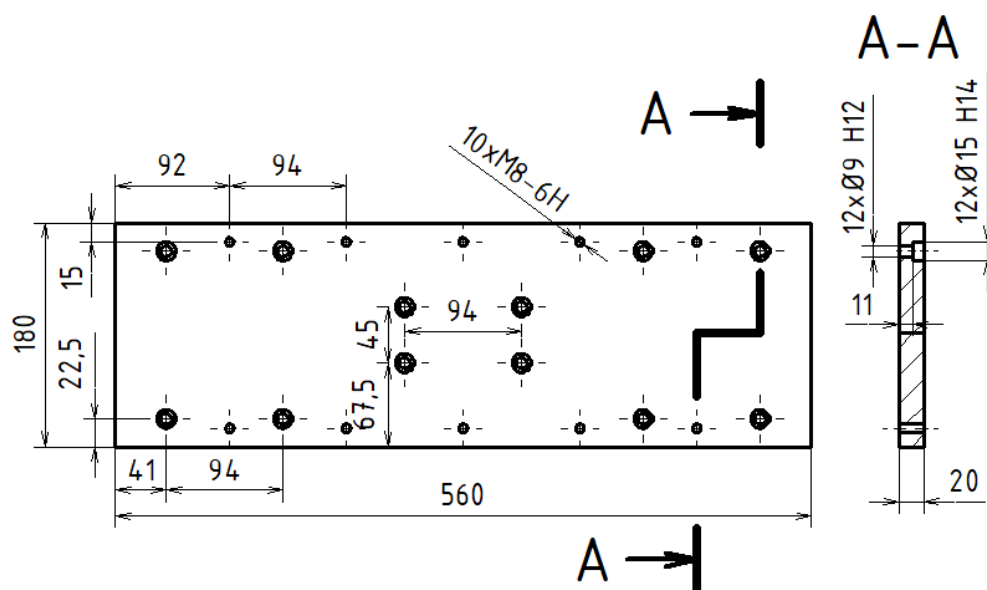
Deska tloušťky 20 mm je zhotovena z materiálu EN AW 6082. Obsahuje díry s válcovým zahloubením pro šrouby s válcovou hlavou M8. První sada děr slouží ke spojení desky a žeber a druhá ke spoji mezi deskami.



Obrázek 56 Horní deska [Autor]

### 3.7.1.2. Spodní deska

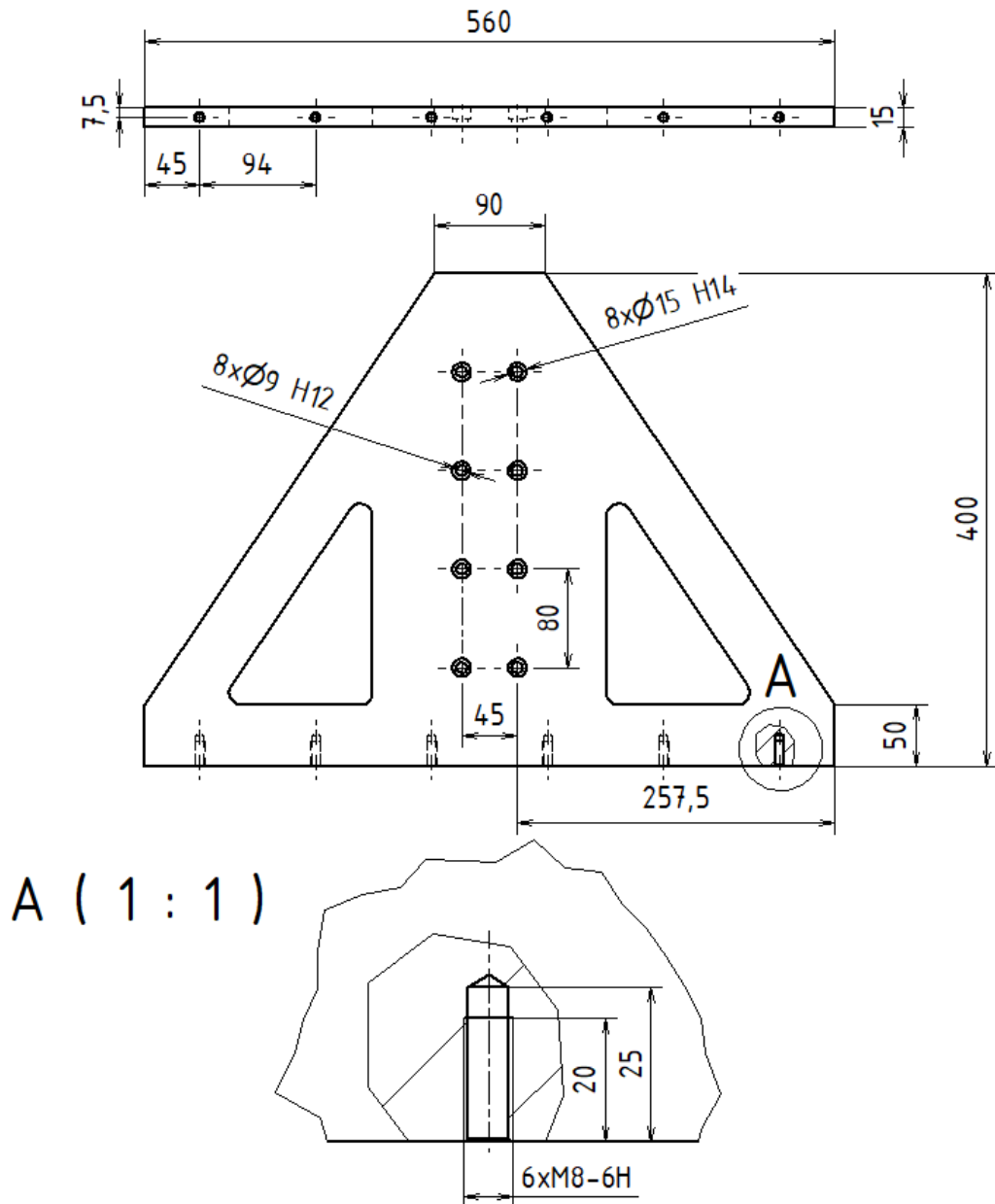
Spodní deska je zhotovena ze stejného materiálu stejné tloušťky jako deska horní. Obsahuje díry se závitem pro spoj mezi deskami a díry s válcovým zahloubením pro spoj mezi vozíkem LO osy Y a spodní deskou.



Obrázek 57 Spodní deska [Autor]

### 3.7.1.3. Žebra

Jedná se o dvě rovnoběžně uložená žebra, mezi kterými je připevněna noha portálu. Žebra jsou z hliníkového plechu tloušťky 15 mm a jsou pomocí šroubů M8 připevněny k horní desce. Žebra pomáhají zvýšit tuhost konstrukce.

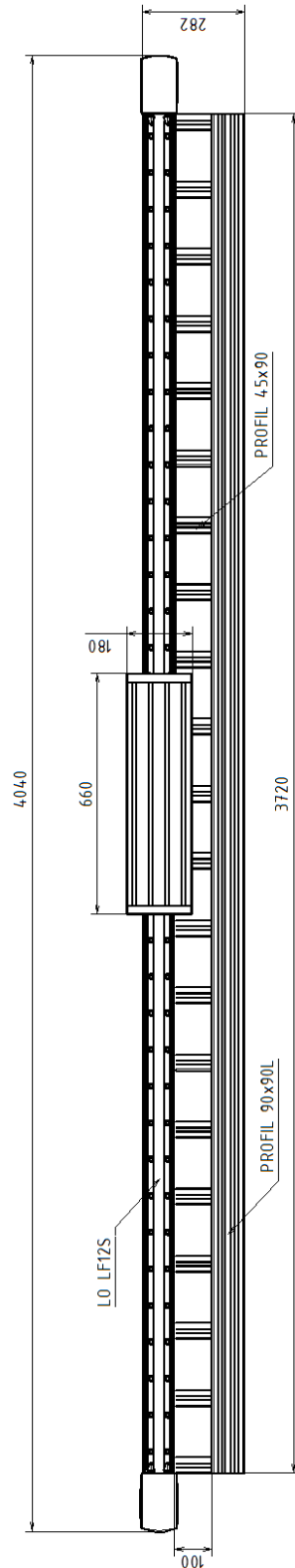


Obrázek 58 Žebra [Autor]

### 3.7.2. Konstrukce nosníku

Na základě provedeného výpočtu byla zvolena verze 3. Nosník se skládá z lineární osy LF12S od firmy Bosch a z prutového tělesa, které se skládá z podélného pásu tvořeného profilem 90x90L a svislých vzpěr z profilu 45x90. Spoj mezi profily lze realizovat několika způsoby. První možností je rychlospojka pro spoje s pravým úhlem, ale tato možnost vyžaduje hodně obrábění. Při množství spojů, které pro spoj potřebujeme by byla výsledná

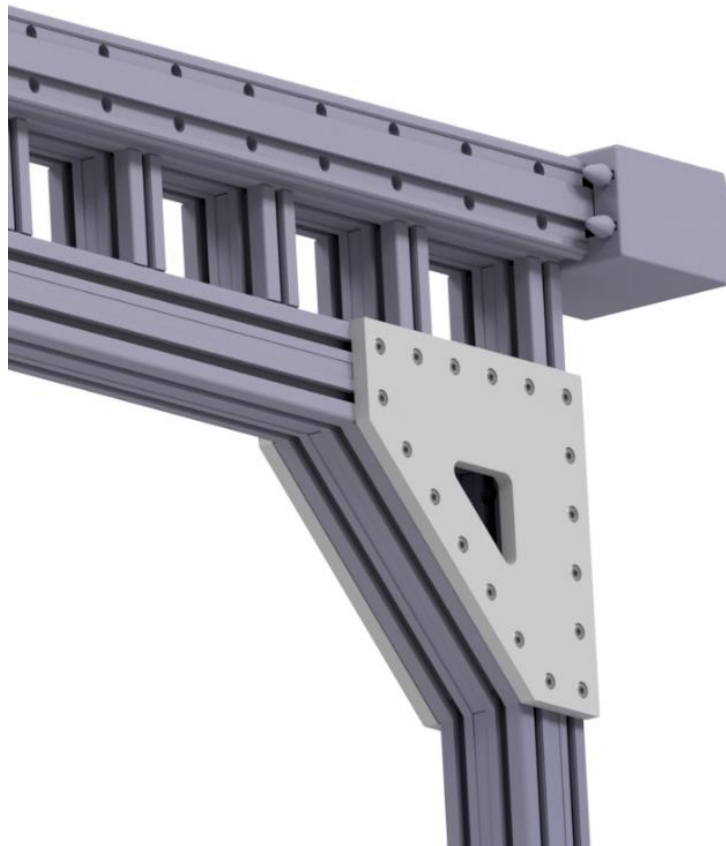
cena vysoká. Další možností je použití centrálních šroubů. Oproti rychlospojce se jedná o levnější spolehlivou variantu, která je pro toto použití vhodnější. Existují další možnosti, jak spoje dosáhnout, ale zmíněné možnosti jsou pro spoj nejvhodnější.



*Obrázek 59 Konstrukce nosníku [Autor]*

### 3.7.3. Spoj mezi nohou a nosníkem

Spojení profilu nohy portálu a nosníku je realizován vnitřními držáky. Roh je vyztužen profilem 45x90, který je k profilům pod úhlem 45° připojen rychlospojkami. Roh je dále vyztužen z obou stran uloženým hliníkovým plechem tloušťky 15 mm připevněným šrouby ISO 4762 - M8x18-8.8 a T-matic M8.



*Obrázek 60 Roh portálu [Autor]*

### **3.8. Montáž**

Montáž se dá rozdělit do tří částí. Montáž nosníku, montáž nohou a spojení těchto dvou celků.

#### **3.8.1. Montáž nosníku**

Do podélné drážky profilu se na dané pozice připraví centrální šrouby. V dalším kroku se přišroubují jednotlivé svislé pruty a následně se stejným způsobem připevní LO k druhým koncům svislých prutů.

#### **3.8.2. Montáž nohou**

Do drážek vozíku se připraví T-matice, poté se k vozíku připevní spodní deska šrouby M8. V dalším kroku se přišroubují žebra k horní desce a do drážek profilu tvořící nohu se vloží T-matice. Posledním krokem je spojení profilu s žebry a spojení spodní a horní desky.

#### **3.8.3. Montáž portálu**

V prvním kroku je nutné do drážek profilů vložit T-matice, jelikož by nebylo možné tento úkon provést v pozdějších fázích montáže. Následně se vnitřními držáky spojí nohy s nosníkem. Dále rychlospojkami připojíme šikmou vzpěru pomocí již připravených T-matic a šroubů M8 připojíme hliníkový plech.

## 4. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout osu X velkoformátové 3D tiskárny. Byla zvolena portálová konstrukce složená z hliníkových profilů a jako náhon byla použita lineární osa od firmy Bosch. Rozměry tiskové plochy se odvíjely od velikosti LO.

Podařilo se navrhnout tři verze, ze kterých se následně na základě kontrolního výpočtu vybralo nejvhodnější řešení. Portál je na obou koncích zakončen patkami, na kterých jsou připraveny otvory pro připojení na vozíky osy Y.

Zatím není vypracována konstrukce osy Z a extruderu. Z tohoto důvodu je možné, že se konstrukce osy X bude muset upravit, především kvůli momentu působícího na vozík LO vzniklého uložením extruderu mimo osu.



*Obrázek 61 Sestava [Autor]*



## 5. Seznam použité literatury

- [1] G-CODE, jádro 3D tisku. *Vše pro 3D tisk* [online]. Mělník [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/s/gcode1>
- [2] FUSED DEPOSITION MODELING. *Technologie 3D tisku* [online]. Brno [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-technologie-3d-tisku/>
- [3] 3D Tisk. *Svět hardware* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- [4] FDM. *Cotu* [online]. Praha [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/134/fdm-fused-deposition-modeling>
- [5] Konstrukce 3D tiskáren. *Svět hardware* [online]. Praha [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [6] SLS. *Cotu* [online]. Praha [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selektivni-laserove-spekani>
- [7] SLM. *Cotu* [online]. Praha [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/metoda-slm>
- [8] ABS. *Simplify3D* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>
- [9] ABS. *Materialpro 3D* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [10] PLA. *Materialpro 3D* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [11] PRŮŠA, Josef. Original Prusa XL. *Prusa Research* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/original-prusa-xl-corexy-3d-tiskarna-s-perfektni-prvni-vrstvou-a-hromadou-novinek\\_58312/](https://blog.prusa3d.com/cs/original-prusa-xl-corexy-3d-tiskarna-s-perfektni-prvni-vrstvou-a-hromadou-novinek_58312/)
- [12] WAAM. *Ramlab* [online]. 2022 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.ramlab.com/resources/waam-101/>
- [13] WRIGHT, Ian. WAAM, BAAM. *Engineering.com* [online]. 2018 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/waam-baam-thank-you-am>
- [14] HOMOLA, Jan. Hybridní výroba. *3D-tisk.cz* [online]. 2019, 15. 2. 2019 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/hybridni-vyroba/>
- [15] Pricci, Alessio, Marco D. de Tullio, and Gianluca Percoco. 2021. "Analytical and Numerical Models of Thermoplastics: A Review Aimed to Pellet Extrusion-Based Additive Manufacturing" *Polymers* 13, no. 18: 3160. <https://doi.org/10.3390/polym13183160>
- [16] Focus on extruder. *Pollen* [online]. Dostupné z: [https://www.pollen.am/pam\\_technology\\_extruder/](https://www.pollen.am/pam_technology_extruder/)
- [17] SHER, Davide. This company is serially 3D printing custom manholes for drainage. *3D Printing Media Network* [online]. 30. 11. 2021. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/this-company-is-serially-3d-printing-custom-manholes-for-drainage/>
- [18] KOVÁŘÍK, Michal, Pavel SVOBODA a Petr ŠTEMBERK. *Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví* [online]. 2018 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/technologie-3d-tisku-v-architektuře-a-stavebnictví>. Fakulta stavební ČVUT v Praze.



- [19] V ČESKU VZNIKÁ NEJVĚTŠÍ FARMA NA 3D TISK BETONU. HROT [online]. 14. 10. 2021. Dostupné z: <https://www.tydenikhrot.cz/clanek/v-cesku-vznika-nejvetsi-farma-na-3d-tisk-betonu-chce-nabidnout-rychle-a-dostupne-bydleni-ice-coral>
- [20] PÖLZEROVÁ, Pavla. Velkoformátová 3D tiskárna Kreator. *Profi Průmysl* [online]. Dostupné z: <https://www.profiprmysl.cz/dalsi/velkoformatova-3d-tiskarna-kreator-dokaze-tisknout-na-plose-2-x-18-metru/>
- [21] ASA. *Materialpro 3D* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [22] STRÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: [https://www.prusa3d.com/cs/?gclid=Cj0KCQjw-JyUBhCuARIsANUqQ\\_IGZtOglFTU9GjEzZ9K7Vvi1AZCNF\\_AGCLYQ9aRI2tkNeBWJ9V-KcgaApBxEALw\\_wcB](https://www.prusa3d.com/cs/?gclid=Cj0KCQjw-JyUBhCuARIsANUqQ_IGZtOglFTU9GjEzZ9K7Vvi1AZCNF_AGCLYQ9aRI2tkNeBWJ9V-KcgaApBxEALw_wcB)
- [23] ELEGOO NEPTUNE X FDM 3D PRINTER. *ELEGOO* [online]. Dostupné z: <https://www.elegoo.com/products/elegoo-neptune-x-fdm-3d-printer>
- [24] 3D Printers 102. *8059 BLANK* [online]. Dostupné z: <https://8059blank.github.io/individual/3D-printers-102/>
- [25] Selective Laser Sintering, SLS. *MANUFACTURINGGUIDE* [online]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>
- [26] LANGNAU, Leslie. What is the maximum size build for an additive manufacturing system? *Make Parts Fast* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.makepartsfast.com/what-is-the-maximum-size-build-for-an-additive-manufacturing-system/>
- [27] WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM). *TWI* [online]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137>
- [28] PLA tisková struna. In: *PRUSA REASERCH* [online]. Praha [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/perlova-cervena-pla-tiskova-struna-filament-1kg/>
- [29] Lineární vedení kuličkové. In: *THK* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.thk.com/?q=cz/node/3749>
- [30] Strut profiles. *Bosch Rexroth katalog* [online]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/>
- [31] Connection elements. *Bosch Rexroth katalog* [online]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/>
- [32] ŠVEC V., Části a mechanismy strojů – spoje a části spojovací, ČVUT Praha, 1997, Skriptum
- [33] Cam roller guide LF12S – complete axis. *Bosch Rexroth katalog* [online]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/>
- [34] VALÁŠEK, Michael. *Mechanika B*. D1. Praha: ČVUT, 06/2006n. I. ISBN 80-01-02919-0.

## 6. Seznam obrázků

Obrázek 1 Model v programu Blender [Autor] .....	5
Obrázek 2 Příprava modelu ve sliceru [Autor] .....	6
Obrázek 3 Metoda FDM [22] .....	7
Obrázek 4 Kartézská 3D tiskárna [22] .....	8
Obrázek 5 CoreXY [23] .....	8
Obrázek 6 Delta [22] .....	9
Obrázek 7 Polar [22] .....	9
Obrázek 8 Tisková hlava [22] .....	10
Obrázek 9 Tisková podložka [24] .....	11
Obrázek 10 Krokový motor [22] .....	11
Obrázek 11 Rám [22] .....	12
Obrázek 12 Lineární vedení [29] .....	12
Obrázek 13 Řídící jednotka [22] .....	13
Obrázek 14 Filament ve formě struny [28] .....	13
Obrázek 15 Části SLA tiskárny [22] .....	16
Obrázek 16 Metoda SLA-Laser [22] .....	17
Obrázek 17 Metoda DLP-SLA [22] .....	17
Obrázek 18 Metoda MSLA [22] .....	18
Obrázek 19 Schéma SLS 1-prášek, 2-tisková podložka, 3-válec, 4-zdroj světla [25] .....	18
Obrázek 20 Kartézské kinematické uspořádání [22] .....	20
Obrázek 21 Kinematické usprádaní Delta [22] .....	21
Obrázek 22 Metoda WAAM [27] .....	23
Obrázek 23 Princip funkce PAM [16] .....	24
Obrázek 24 Velkoformátová tisková podložka [11] .....	25
Obrázek 25 Konstrukce portálové tiskárny [26] .....	25
Obrázek 26 Extruder připojen na robota [17] .....	26
Obrázek 27 3D tisk z cementových malt [18] .....	27
Obrázek 28 Portálová tiskárna [18] .....	28
Obrázek 29 3D tiskárna s robotickou rukou [18] .....	28
Obrázek 30 Mobilní 3D tiskárna [18] .....	29
Obrázek 31 Schéma řešené tiskárny [Autor] .....	29
Obrázek 32 Konstrukce lineární osy [34] .....	30
Obrázek 33 Nosník [Autor] .....	31
Obrázek 34 Verze 1 [Autor] .....	33
Obrázek 35 Schéma nosníku Verze 1 [Autor] .....	33
Obrázek 36 Verze 2 [Autor] .....	34
Obrázek 37 Schéma nosníku Verze 2 [Autor] .....	34
Obrázek 38 Verze 3 [Autor] .....	35
Obrázek 39 Schéma nosníku Verze 3 [Autor] .....	35
Obrázek 40 Vztahy pro výpočet ložisek [33] .....	37
Obrázek 41 Šroubový spoj [Autor] .....	41
Obrázek 42 Průřezy hliníkových profilů [30] .....	45
Obrázek 43 Obrábění profilů [30] .....	45
Obrázek 44 Přírubová matice a T-šroub [31] .....	46
Obrázek 45 Centrální šroub [31] .....	46
Obrázek 46 T-matice [31] .....	47
Obrázek 47 Paralelní spojka [31] .....	47
Obrázek 48 Rychlospojka [31] .....	48
Obrázek 49 Rychlospojka end-to-end [31] .....	48
Obrázek 50 Rychlospojka end-to-slot [31] .....	49
Obrázek 51 Svorníková spojka [31] .....	49
Obrázek 52 Inner bracket [31] .....	50
Obrázek 53 Konstrukce osy X [Autor] .....	50
Obrázek 54 Spoj mezi nohou a patkou [Autor] .....	51
Obrázek 55 Patka [Autor] .....	51
Obrázek 56 Horní deska [Autor] .....	52
Obrázek 57 Spodní deska [Autor] .....	52
Obrázek 58 Žebra [Autor] .....	53
Obrázek 59 Konstrukce nosníku [Autor] .....	54



---

Obrázek 60 Roh portálu [Autor] .....	55
Obrázek 61 Sestava [Autor] .....	57



## 7. Seznam tabulek

Tabulka 1 Tabulka výsledků průhybu .....	36
Tabulka 2 Tabulka konstant [33] .....	39
Tabulka 3 Tabulka výsledků.....	39
Tabulka 4 Únosnost vozíku .....	40

## 8. Seznam příloh

[Příloha 1]	BP_0000_01	Koncepční návrh osy X
-------------	------------	-----------------------