



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní



# KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY NA FOTOPOLYMER

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Bc. Pavel Mach**  
*Vedoucí práce:* Ing. Petr Zelený, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	<b>Bc. Pavel M A C H</b>
studijní program	<b>N2301 Strojní inženýrství</b>
obor	<b>2302T010 Konstrukce strojů a zařízení</b>
zaměření	<b>Obráběcí a montážní stroje</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Konstrukce 3D tiskárny na fotopolymer**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

Hlavním cílem této práce je provést konstrukční návrh 3D tiskárny na stavbu dílů z fotopolymerů. Vytvrzování materiálů je pomocí promítání obrazců z dataprojektoru. Součástí práce bude rešerše vhodných materiálů pro tuto technologii.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologií 3D tisku vytvrzováním vrstev fotopolymeru pomocí UV světla.
2. Provést studii podobných zařízení.
3. Na základě definovaných parametrů provést návrh celé konstrukce prototypu zařízení.
4. Provést návrh pohonů a způsob řízení pohonů.
5. Navrhnout postup vytváření promítaných obrazců (řezů).
6. Případně provést realizaci a otestování zařízení.



Forma zpracování diplomové práce:

Rozsah průvodní zprávy cca 60 stran textu včetně příloh.  
Diplomová práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložena na CD (či DVD) ke každému tištěnému svazku diplomové práce.

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] SHIGLEY, J.E. – MISCHKE, Ch.R. – BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. VUTIUM 2010, ISBN 978-80-214-2629-0
- [2] NOORANI, R.: Rapid Prototyping: principles and applications. John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73001-7
- [3] JACOBS, P. F.: Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling. ASME Press, 1996, ISBN 0-87263-467-1
- [4] GIBSON, I. - ROSEN, D. W. - STUCKER, B.: Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer, 2010, ISBN 978-1-4419-1119-3

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Šafka, Ph.D.



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

V Liberci dne 15. března 2014

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 23.5.2014

Podpis: *M. Č.*

**TÉMA: KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY NA FOTOPOLYMER**

**ABSTRAKT:** Práce obsahuje přehled metod Rapid prototypingu využívajících ke stavbě fotopolymerů a přehled stavebních materiálů pro tyto metody. Zaměřuje se na metodu vytvrzování vrstev fotopolymeru pomocí projektoru se zobrazovací technologií DLP. Dále práce obsahuje návrh konstrukce 3D tiskárny využívající tuto technologii, volbu koncepce zařízení a jednotlivých komponent tiskárny.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** 3D tiskárna, fotopolymer, DLP

**THEME: CONSTRUCTION OF 3D PRINTER FOR PHOTOPOLYMERS**

**ABSTRACT:** The work contains an overview of Rapid Prototyping methods which uses photopolymers as building material and an overview of building materials for these methods. The work focuses on the method of curing photopolymer layers using a projector with DLP imaging technology. The work includes the construction design of 3D printer that uses this technology, selection of printer conception and selection of individual components of the printer.

**KEYWORDS:** 3D printer, photopolymer, DLP

**Zpracovatel :** TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Počet stran : 76  
Počet příloh : 79  
Počet obrázků : 50  
Počet tabulek : 17  
Počet modelů  
nebo jiných příloh: 12

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
1 Úvod.....	9
2 Cíle práce .....	10
3 Rapid prototyping .....	11
3.1 Co je to Rapid prototyping.....	11
3.2 Přehled metod 3D Rapid prototypingu využívajících ke stavbě fotopolymerů.....	12
3.2.1 SLA – Stereo Litography Aparatus .....	12
3.2.2 SLA využívající 2 lasery.....	13
3.2.3 SGC – Solid Ground Curing.....	14
3.2.4 Jetted photopolymer.....	15
3.2.5 3D DLP tisk .....	16
3.3 Co je to DLP projektor.....	18
3.4 Přehled parametrů zařízení využívajících ke stavbě modelu fotopolymery .....	21
3.4.1 Pegasus Touch Laser SLA 3D Printer .....	21
3.4.2 B9 Creator.....	22
3.4.3 Ilios HD SLA 3D Printer .....	23
3.4.4 3D Systems ProJet® 1200 .....	24
3.4.5 Formlabs The form 1 .....	25
3.4.6 MiiCraft 3D Printer.....	26
3.4.7 Přehledová tabulka parametrů dostupných 3D tiskáren .....	27
4 Stavební materiál .....	28
4.1 Přehled stavebních materiálů .....	29
4.1.1 EnvisionTEC.....	29
4.1.2 Formlabs Resin .....	30
4.1.3 SEDGWICK™ UV Cured Acrylic based Resin.....	30
4.1.4 Spot-A materials .....	31

5 Volba koncepce tiskárny .....	35
5.1 Uspořádání s projektorem nad vanou s fotopolymerem .....	35
5.2 Uspořádání s projektorem pod vanou s fotopolymerem.....	36
5.3 Zvolení koncepce tiskárny .....	37
6 Výběr projektoru.....	38
7 Konstrukce nádrže fotopolymeru.....	41
8 Pohonné jednotky .....	46
8.1 Vertikální osa Z .....	46
8.2 Horizontální vedení nádrže .....	54
8.3 Vedení projektoru .....	56
8.4 Řízení os .....	58
8.5 Cenová rozvaha variant vedení.....	60
9 Rám tiskárny .....	63
10 Software .....	65
11 Celková cenová kalkulace .....	68
12 Realizace návrhu 3D tiskárny .....	69
13 Závěr .....	72
Soupis bibliografických citací .....	73
Seznam příloh .....	76

## Seznam použitých zkratk a symbolů

3D - Three dimensional	Trojrozměrný
ABS - Akrylonitrilbutadienstyren	
CAD - Computer aided design	Počítačem podporované konstruování
CMOS - Complementary Metal–Oxide–Semiconductor	Technologie integrovaných obvodů
DPH - Daň z přidané hodnoty	
DLP - Digital light procesing	Technologie zpracování světelného obrazu
DMD -Digital micromirror device	Mikrozrcadlový čip
FDM - Fused deposition modeling	Typ technologie rapid prototypingu
LED - Light-emitting diode	Světlo-emitující dioda
LPT – Line Printer Terminal	Paralelní port tiskárny
PCI - Peripheral Component Interconnect	Sběrnice pro připojení k základní desce
PDMS - Polydimethylsiloxane	Polydimethylsiloxan
PUR - Polyurethane	Polyuretan
RGB - Red-green-blue	Barevný prostor červená - zelená - modrá
RGB+W - Red-green-blue+white	Barevný prostor červená-zelená-modrá+bílá
SGC - Solid ground curing	Metoda rapid prototypingu SGC
SLA - Stereolithography apparatus	Stereolitografie
STL - Standard Tessellation Language	Formát souboru pro data stereolitografie
USD - United states dolar	Americký dolar
UV - Ultraviolet	Ultrafialové záření

\$ - Americký dolar

€ - Euro



# 1 Úvod

Trendem moderní výroby je co nejvíce zkrátit dobu vývoje nového výrobku od první myšlenky po jeho uvedení na trh. To s sebou mimo jiné nese i požadavky na rychlý vývoj prototypů. Tak vzniklo celé nové odvětví výrobních technologií – RAPID PROTOTYPING. Tyto technologie umožňují tvorbu 3D objektů přímo z 3D CAD dat. Oproti konvenčním způsobům výroby, kdy je výsledný tvar objektu dosažen buď tvářením nebo odebráním materiálu z polotovaru, se technologie Rapid Prototypingu vyznačují postupným přidáváním materiálu. Takto zhotovený prototyp je zpravidla levnější – není zapotřebí výroba různých přípravků, forem atd. Druhou klíčovou vlastností je, že technologiemi Rapid prototypingu lze zhotovit tvarově složité objekty, které by byly konvenčními technologiemi velice těžko zhotovitelné až nevyrobitelné.

První 3D tiskárny, které se staly cenově dostupné i širší veřejnosti využívají technologii FDM, což je vytlačování roztavené struny z ABS. Spolu s klesající cenou fotopolymerů a kvalitních DLP projektorů s dostatečným rozlišením se v současné době začíná rozvíjet i technologie 3D DLP tisku. Tato metoda je sice stále nákladnější jak v případě samotného stroje tak i stavebního materiálu, lze s ní však stavět kvalitativně lepší modely. 3D DLP tisk svým principem leží mezi dvěma historicky staršími metodami, dnes již prakticky nepoužívanou metodou SGC, u které byl fotopolymer vytvrzován UV lampou přes stínítko a metodou SLA, jenž se dnes hojně uplatňuje v komerčních strojích a patří mezi špičku v této oblasti.

Proces 3D tisku lze ve zkratce shrnout do několika kroků. 3D CAD model je převeden do formátu .stl, naorientován do pracovního prostoru stroje a jsou vygenerovány případné podpěry. Následně je model rozřezán do vrstev, které se budou postupně stavět. Geometrie jednotlivých vrstev se přenesou do tiskárny a ta tyto vrstvy postupně vytváří jednu přes druhou. Proces nanášení vrstev pokračuje až do vystavění celého objektu. Po ukončení samotného tisku je model vyjmut z tiskárny. Dále je nutné model ještě dokončit, těmto úpravám po samotném tisku se říká post-processing. Mezi ně spadá odstranění případného podpurného materiálu a očištění modelů. Dále to je provedení úprav povrchu nebo další dovytvřování v peci atd.. Úpravy spojené s post-processingem jsou úzce spojeny s použitou technologií 3D tisku a dále s požadavky kladenými na výsledný model.

## 2 Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je návrh a konstrukční řešení 3D tiskárny využívající ke stavbě technologie vytvrzování fotopolymeru pomocí DLP projektoru.

V práci se nejprve podíváme na ostatní metody Rapid prototypingu využívající ke stavbě objektu fotopolymerů. Dále se seznámíme se stavebním materiálem, kterým jsou fotopolymery a také s několika již komerčně vyráběnými typy fotopolymerů. Pak se budu věnovat teorii samotného 3D DLP tisku a podíváme se i na jednotlivé komponenty takového zařízení, jako je 3D DLP projektor či lineární osy a vedení. Pokračovat budu výběrem vhodných komponent pro stavbu zařízení využívající tuto technologii a přistoupím k samotnému konstrukčnímu řešení 3D DLP tiskárny. V závěru práce se ještě podíváme na software a řízení takové tiskárny. Protože v době dokončení této diplomové práce už započala realizace návrhu 3D DLP tiskárny, tak si ukážeme i něco ze stavby takového zařízení.

## 3 Rapid prototyping

### 3.1 Co je to Rapid prototyping

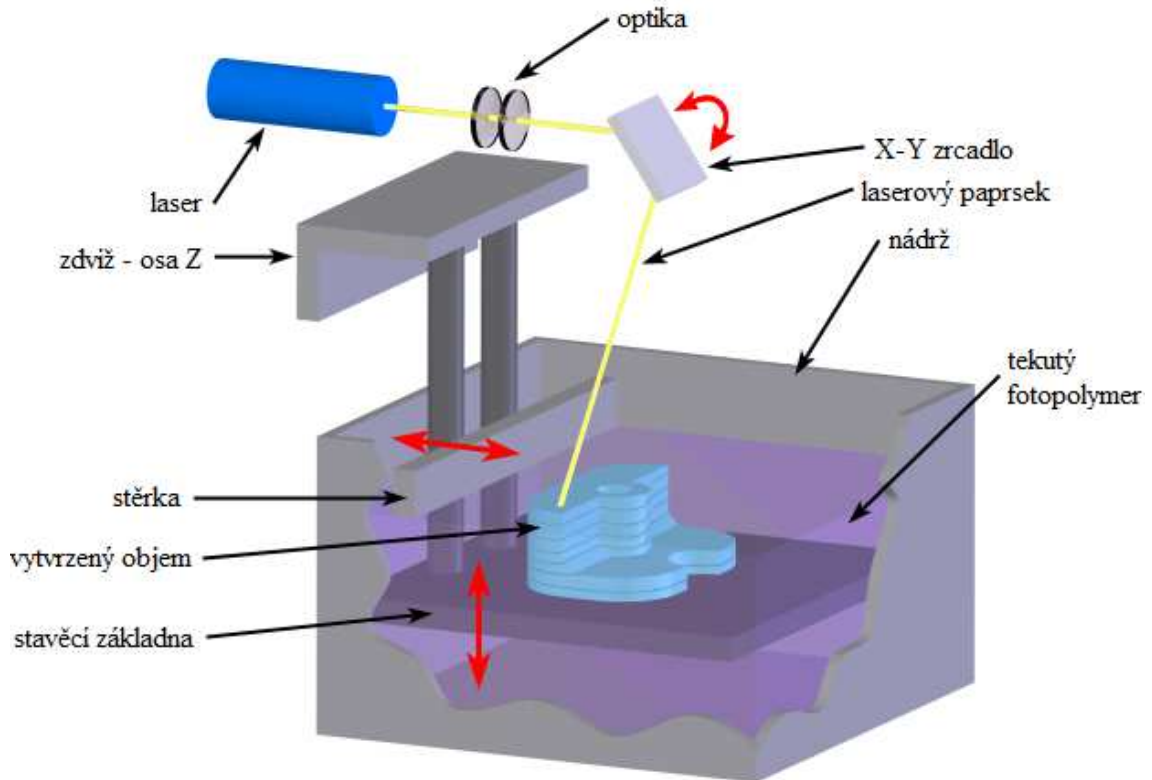
Rapid prototyping - rychlý vývoj prototypu. Jedná se o souhrn technologií, které umožňují z návrhu, zpravidla z CAD dat, vytvořit přímo 3-rozměrný celistvý fyzický prototyp z původních materiálů. Prototyp je zpravidla vytvářen nanášením materiálu po vrstvách, nikoliv jeho odebráním z polotovaru, jak je tomu u konvenčních metod.

Využití takto zhotoveného prototypu je pak od prezentace a ověření designu, takové prototypy jsou prototypy designu. Dále to jsou konstrukční prototypy sloužící ke zkoušení vlastností založených na tvaru součásti ke kontrole rozměrů či k ověření montáže. Funkční prototypy k testům, jako je například obtékání. V případě kdy je ke zhotovení prototypu použit materiál svými mechanickými vlastnostmi podobný materiálu, který bude použit u finálního výrobku, jedná se o technický prototyp. Další využití je při výrobě tvarově složitých dílců, kdy je takto vytvořený prototyp použit jako master ke zhotovení formy pro dílec. Například voskový prototyp lze použít k vytvoření skořepinové formy pro technologii lití na ztracený model, nebo plastový prototyp lze použít k výrobě silikonové formy pro odlitky z PUR.

Proces výroby takového prototypu lze pak rozdělit do několika základních kroků. Prvním krokem je zpracování návrhu do 3D CAD modelu. Ve druhém kroku je tento model převeden do STL formátu, je zkontrolována úplnost povrchu a objekt naorientován. Proces pokračuje přidáním podpůrné konstrukce, ta má za účel přidržovat nanášený materiál v místech, kde by se jinak nanášel do vzduchoprázdna. Dalším krokem je vrstvení, ve kterém je model rozvrstven do jednotlivých vrstev. Až doposud se celý proces odehrával pouze v počítači. Nyní je možné začít se samotnou stavbou, data jsou odeslána do 3D tiskárny a ta může začít se stavbou nanášením jednotlivých vrstev. Po ukončení stavby a vyjmutí prototypu z tiskárny se obvykle provádějí dokončovací operace, odstraní se podpěry, prototyp se očistí, popřípadě je možné provést povrchové úpravy ke zlepšení drsnosti atd..

## 3.2 Přehled metod 3D Rapid prototypingu využívajících ke stavbě fotopolymerů

### 3.2.1 SLA – Stereo Litography Aparatus



Obr. 1: Metoda SLA [3]

Metoda představená v roce 1988 3D Systems, Inc., jako první metoda rapid prototypingu. [3] Tato metoda využívá ke stavbě fotopolymeru vytvrzovaného laserovým paprskem bod po bodu.

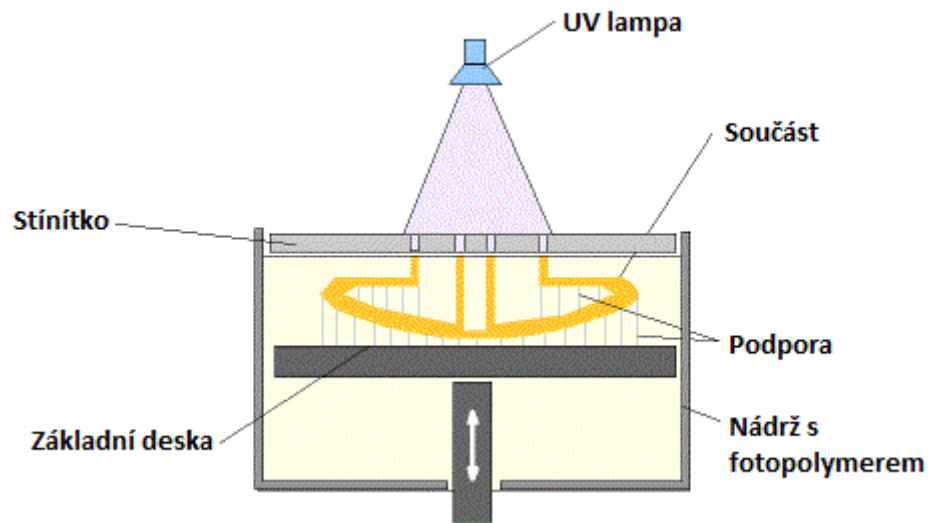
Ozařování laserovým paprskem je velmi přesné, což vede k možnosti vytvářet velice detailní objekty a k vysoké přesnosti výsledného prototypu ( $\pm 0,05\text{mm}$ ) i k jeho dobré povrchové drsnosti. Po dotvrzení v peci má takový prototyp také dobré materiálové vlastnosti. Mezi nevýhody patří hlavně nákladnost na udržování vany plné fotopolymeru, nemožnost vytvoření dutých těles – uvnitř dutin zůstává uzavřen nevytvrzený fotopolymer. Dále pak umožňuje stavět pouze objekt z jednoho materiálu a to včetně podpor. Nevýhodou je i nutnost použití post-procesingu – dalšího vytvrzování v peci ke stabilizaci a dotvrzení součástí.

Metoda je citlivá na intenzitu laserového paprsku a délku ozařování každého bodu. Ta musí být zvolena tak, aby se jednotlivé body vrstvy propojily a aby se spojily i s vrstvou předchozí. Proniknutí jednotlivých vytvrzených bodů by mělo být zhruba 30%. Pokud je ozáření nedostatečné, nedojde k dostatečnému propojení jednotlivých vytvrzených bodů a proniknutí do předchozí vrstvy, což má za následek de-laminaci součásti. V případě zvolení přílišného ozáření toto vede k nadměrnému zkroucení součásti. Zkroucení také zabraňuje systém vyplňování obsahu každé vrstvy šrafováním tak, že šrafy jsou ve dvou vrstvách vzájemně natočeny, běžně se používá přírůstek 60° natočení s každou následující vrstvou. Zkroucení může nastat i vlivem nedovytržení nebo příliš velkou časovou prodlevou mezi vytvořením součásti a jejím dovytržením v peci.

### **3.2.2 SLA využívající 2 lasery**

K vytvrzování je použito dvou laserů, ovšem s nižším výkonem oproti předchozí metodě. Výkon laseru musí být tak nízký, aby při ozáření pouze jedním laserovým paprskem nedošlo k zahájení procesu fotopolymerizace. Proces fotopolymerizace začne jen v místě setkání obou laserových paprsků, kde součet jejich výkonů dodá dostatečnou energii fotoinciátoru k zahájení reakce. Objem je vytvrzován uvnitř objemu fotopolymeru v nádrži, nikoliv na jeho hladině, a tak u této metody není přítomna osa Z ovládající zdvih základní desky.

### 3.2.3 SGC – Solid Ground Curing

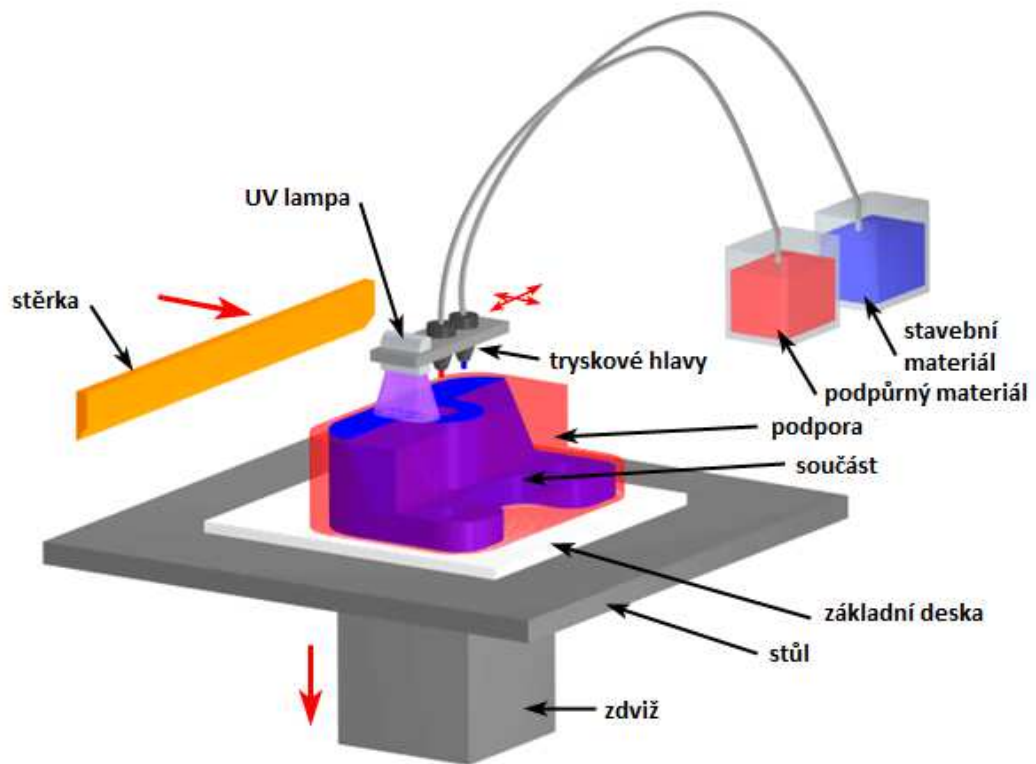


Obr. 2: Metoda SGC [4]

Kvůli složitému zařízení a z toho vyplývajícím vyšším nákladům (cena zařízení 200000 až 350000 USD) dnes již nepoužívaná technologie. Stavebním materiálem zde byl fotopolymer vytvrzovaný pomocí UV lampy. Geometrie vrstvy bylo dosaženo působením UV záření přes stínítko. Pro každou vrstvu bylo potřeba její vlastní stínítko. Podpurným materiálem u této technologie byl vosk. Technologie dosahovala přesnosti  $\pm 0,09$  mm, rovinnosti 0,15 mm a vyznačovala se velkou přesností v ose Z, protože po vytvrzení každé vrstvy došlo k zafrézování plochy do roviny. Tloušťka vrstvy se pohybovala mezi 0,1 a 0,2 mm.

Stavební proces probíhal zhruba tak, že došlo k nanesení a rovnoměrnému rozetření vrstvy fotopolymeru. Geometrie vrstvy byla vytvrzena UV světlem přes příslušné stínítko. Přebytný nevytvrzený fotopolymer odsál vysavač zbytkového fotopolymeru a místo něho byl nanesen a rozetřen vosk. Vosk zde plnil funkci podpurného materiálu. Po ztvrdnutí vosku vrstvu zarovnávala na požadovanou tloušťku fréza. Odfrézovaný materiál se odsál a mohla být nanášena další vrstva.

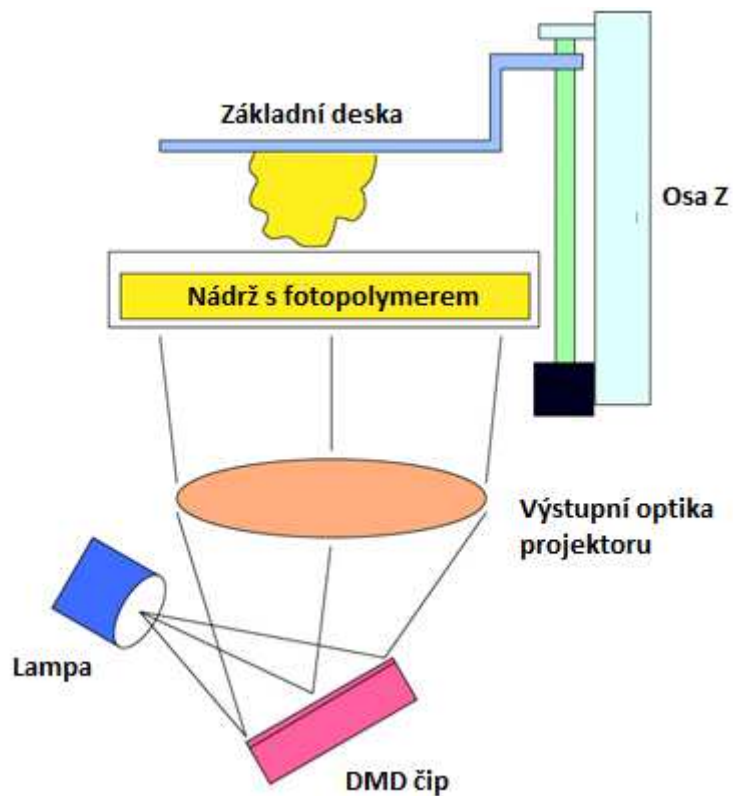
### 3.2.4 Jetted photopolymer



Obr. 3: Metoda Jetted photopolymer [3]

Zde je fotopolymer nanášen podobně jako inkoust v inkoustové tiskárně pomocí hlav s tryskami. Hlavy s tryskami se pohybují v osách X a Y, pohyb v ose Z obstarává pohyblivý stůl. S tryskovými hlavami se pohybuje i UV zářič, který materiál hned po nanesení vytvrzuje. Tato koncepce má oproti ostatním metodám využívajících fotopolymery zásadní výhodu - lze stavět z více materiálů najednou. To jednak usnadňuje post-procesing, protože lze na podpory použít jiný materiál než stavební a tento je pak snadněji a rychleji odstranitelný a dále je možné vytvářet součásti z vícebarevných materiálů, či materiálů s rozdílnými vlastnostmi.

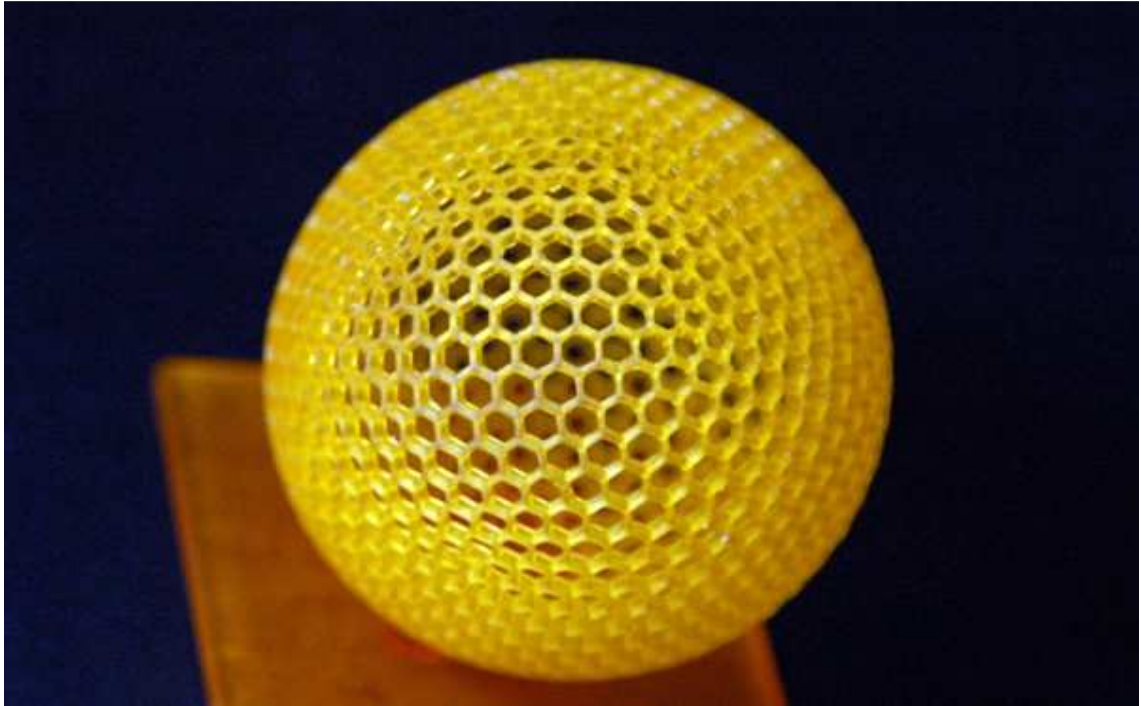
### 3.2.5 3D DLP tisk



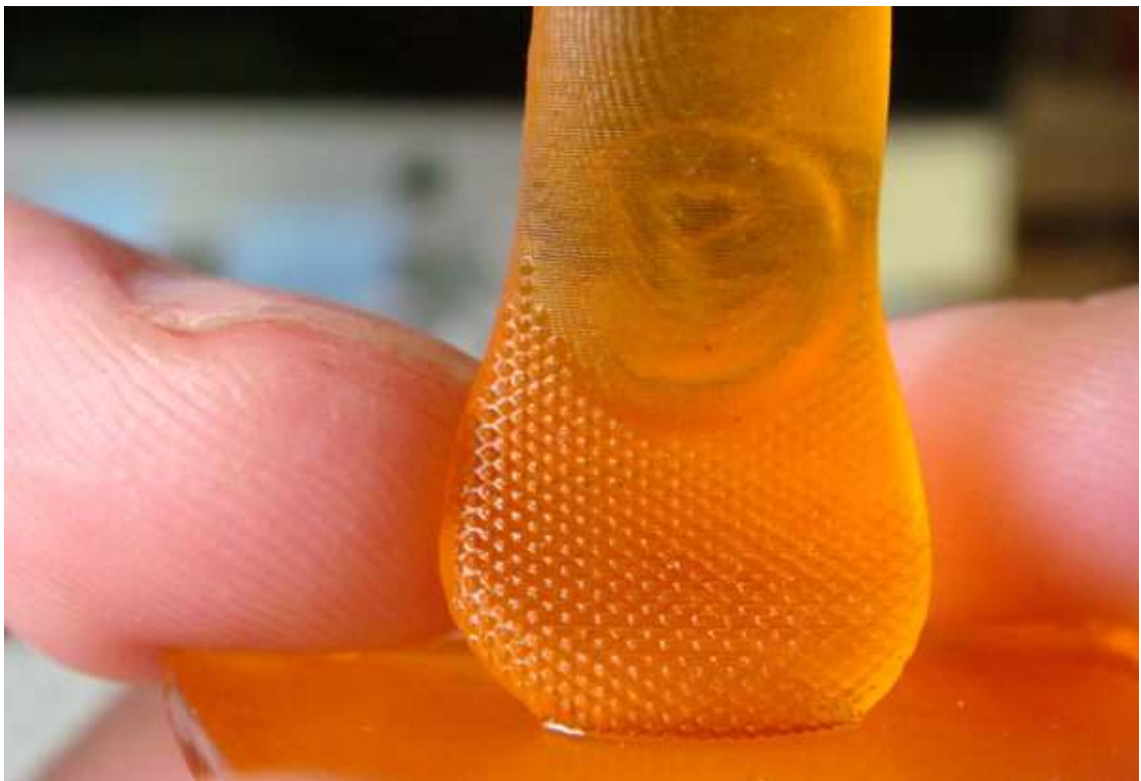
Obr. 4: Metoda 3D DLP [5]

Ve své podstatě se jedná o kombinaci variant SLA a dnes již nepoužívané metody SGC, kde je stínítko nahrazeno DMD čipem v DLP projektoru. Z metody SLA si tato metoda bere nádrž s fotopolymerem, která ovšem u některých koncepcí nemusí být plná jako u metody SLA, ale stačí pouze nízká hladina fotopolymeru na dně nádrže. Tím odpadávají problémy s uchováváním velkého množství namíchaného fotopolymeru a usnadňuje to i změnu typu materiálu v zařízení. Stavění na základní desce, jenž se pohybuje ve vertikální ose Z, je rovněž podobné s metodou SLA. Stejně tak i možnost stavět součást jen z jednoho materiálu a to včetně podpůrné konstrukce. Vytvrzování fotopolymeru zde však probíhá v celé vrstvě najednou obdobně jako u metody SGC. Technologií 3D DLP tisku lze vytvořit velmi detailní modely kvalitativně se blížícím profesionálním a velmi drahým metodám jako SLA a s náklady jen o málo vyššími, než u dnes velmi rozšířené metody FDM, která ovšem nedosahuje takové detailnosti modelu nebo kvality povrchu. Kvalita modelů vytvořených technologií 3D DLP tisku je patrná na obrázcích 5, 6 a 7.





*Obr. 5: Ukázka modelu vytvořeného technologií 3D DLP tisku [6]*



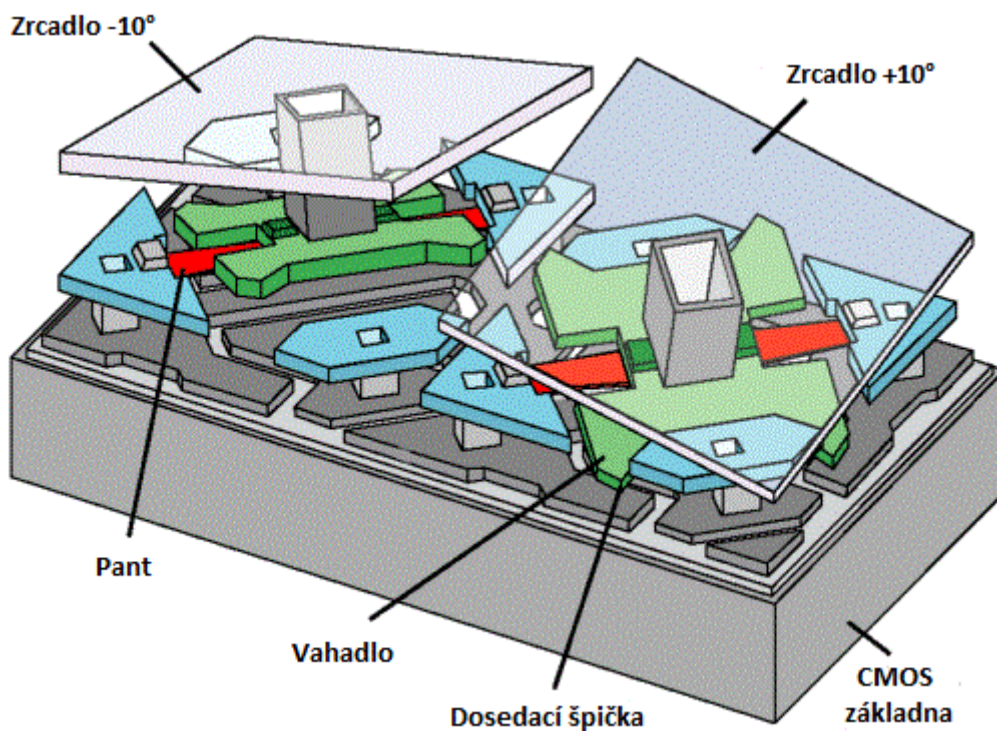
*Obr. 6: Ukázka povrchových detailů modelu vytvořeného technologií 3D DLP tisku [6]*



*Obr. 7: Model sovy vytvořený technologií 3D DLP tisku [6]*

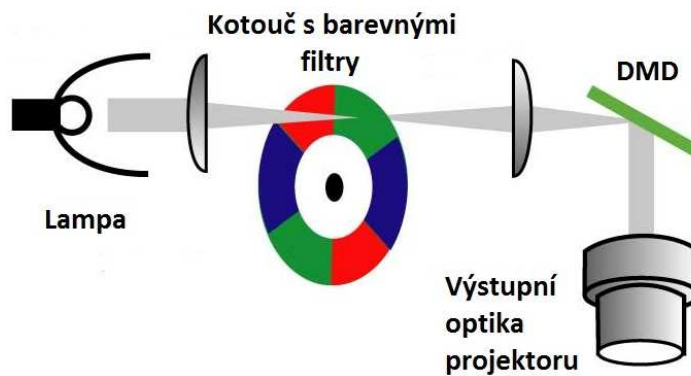
### **3.3 Co je to DLP projektor**

DLP projektor, zkratka pochází z anglického Digital Light Processing, je zařízení sloužící k projekci digitálního obrazu. Zobrazovacím prvkem je DMD čip, z anglického Digital Micromirror Device. Povrch DMD čipu je složen z mikrozrcadel, kde pro každý zobrazovaný pixel je jedno zrcadlo. Naklápěním zrcadla je určen jas i barva pixelu.



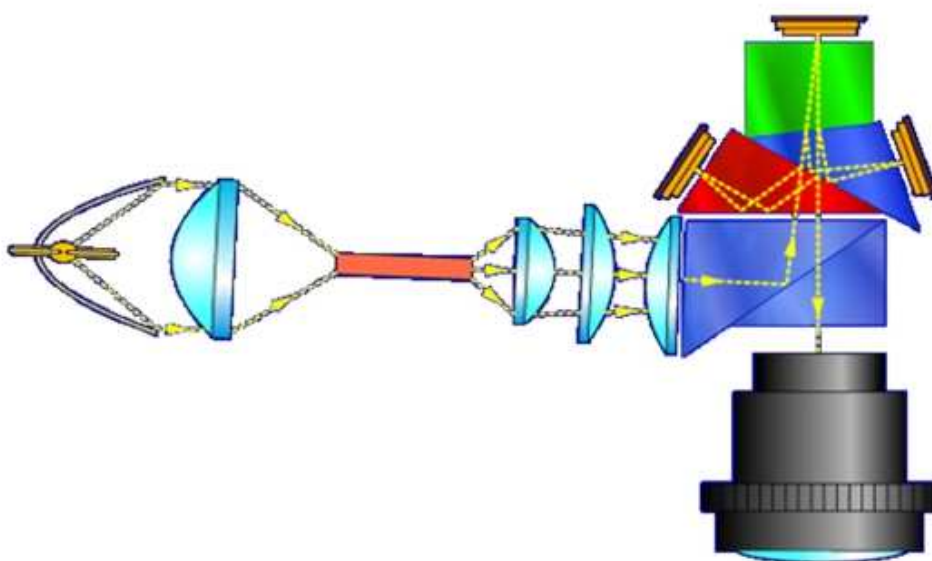
Obr. 8: Detail DMD chipu [7]

Princip funkce projektoru je následující. Ze zdroje světla – lampy vychází světelný tok, ten prochází rotujícím barevným válcem nebo kotoučem. Kotouč nebo válec je rozdělen po svém obvodu na tři úseky nebo čtyři úseky. Každý úsek propouští jen určitý rozsah vlnových délek. Jednotlivé úseky tvoří barevné filtry - červený, zelený a modrý, může být přítomen i čtvrtý filtr propouštějící bílé světlo. Dohromady filtry vytvářejí barevný model RGB v případě použití tří filtrů respektive RGB+W v případě použití čtyř filtrů. Toto barevné spektrum je postupně vysíláno na DMD čip. Způsobem jak snížit otáčky válce a hlučnost je použití SCR válce, ten má po obvodě více sad RGB filtrů, tím jsou umožněny nižší otáčky válce. DMD čip pak pomocí naklápění jednotlivých mikrozrcadel skládá z tohoto RGB+W spektra barvu a jas pro každý zobrazovaný pixel. Takto vytvořený obraz je poté pomocí výstupní optiky – objektivu promítán na zobrazovací plochu. Na tomto principu fungují projektory s jedním DMD čipem.



Obr. 9: Schéma základního uspořádání projektoru s jedním DMD čipem [8]

Druhou skupinou jsou projektory s více DMD čipy. Konstrukční uspořádání je patrné na obrázku 10. Konkrétně jde o tři čipy, kde se každý stará o zobrazování pouze jedné barvy z RGB spektra. Oproti konfiguraci s jedním čipem zde není použito válce nebo kotouče s barevnými filtry k rozkladu světelného toku do RGB spektra. Zde světlo rozkládá a směřuje na jednotlivé DMD čipy soustava optických hranolů. Výhodou takové koncepce je neustálé promítání jednotlivých barev. Skládání barev tedy probíhá už ve výstupní optice projektoru, zobrazována je tak přímo požadovaná barva a další výhodou je pak rychlejší odezva na změnu obrazu. Oproti tomu projektor s jedním čipem promítá postupně červenou, zelenou a modrou složku obrazu. To, že se obraz jeví jako barevně celistvý, je způsobeno nedokonalostí lidského oka, které není schopné postřehnout tak rychlou změnu obrazu a jednotlivé barvy tak splývají do jedné.



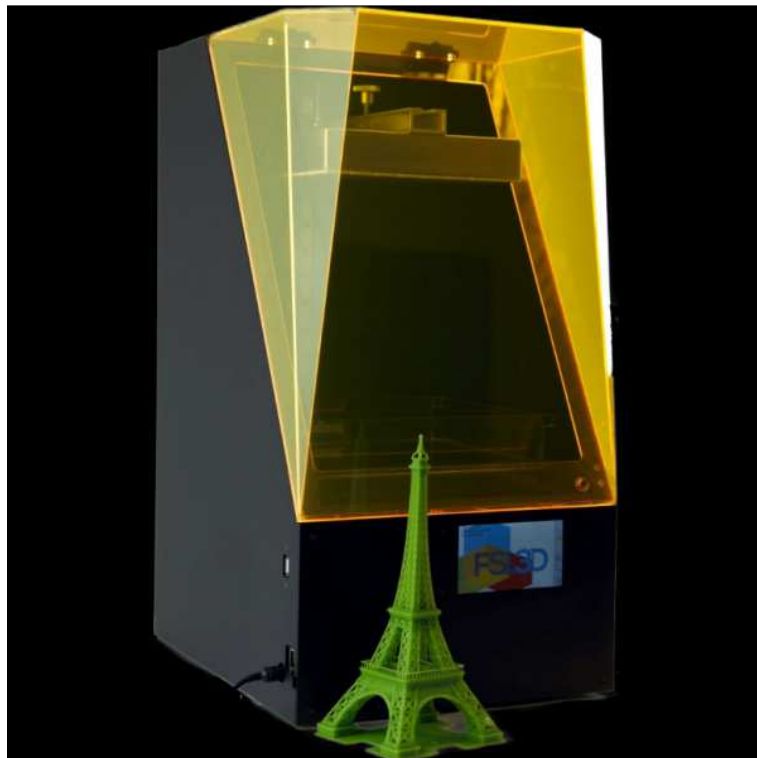
Obr. 10: Schéma základního uspořádání projektoru se třemi DMD čipy [9]



## 3.4 Přehled parametrů zařízení využívajících ke stavbě modelu fotopolymery

### 3.4.1 Pegasus Touch Laser SLA 3D Printer

Tiskárna využívá technologie SLA, k vytváření tedy používá laser. Fotopolymer je u této tiskárny ozařován zespodu skrze dno nádrže a základní deska, na které je stavěn model, se postupně zvedá nahoru nad hladinu fotopolymer. Pulsní laser má vlnovou délku 405 nm a dokáže pulzovat s frekvencí až 500 kHz. Laser je schopen zostřit do bodu o průměru 250 mikronů a dráhu sledovat rychlostí až 3000 milimetrů za sekundu. Přesnost sledování laseru v ose X a Y je udávána 3 mikrony. Přesnost v ose Z je pak 5 mikronů a typická tloušťka vrstvy je mezi 25 a 100 mikrony. Velikost pracovního prostoru tiskárny je 7 x 7 x 9 palců, což odpovídá 177 x 177 x 228 mm. Maloobchodní cena tiskárny je stanovena na \$3499 [11], což při kurzu amerického dolaru z května 2014 odpovídá zhruba 70000,- Kč. Tiskárna Pegasus Touch Laser SLA 3D Printer je zobrazena na Obr. 11.



*Obr. 11: Pegasus Touch Laser SLA 3D Printer [10]*

### 3.4.2 B9 Creator

B9 Creator je tiskárna od B9Creations, LLC. Tato tiskárna vytvrzuje fotopolymer DLP projektorem s rozlišením 1024x768 obrazových bodů. Ozařování fotopolymeru projektorem je zespodu skrze dno nádrže - vrstva je vytvrzována na dně nádrže. Tomuto rozlišení odpovídá i velikost pracovního prostoru, která je maximálně 102 x 76 x 203 mm. Rozlišení projektoru a velikosti pracovního prostoru v osách X a Y odpovídá rozlišení 100 mikronů v ose X a Y na obrazový bod. Stavební rychlost se pohybuje mezi 12 až 20 milimetry za hodinu, jde o rychlost růstu výšky modelu v ose Z. Přesnost stavby je pak udávána 50 až 100 mikronů. Maloobchodní cena plně sestaveného zařízení je \$4995 respektive \$2990 v případě stavebnice v rozsypu, to při kurzu amerického dolaru z května 2014 odpovídá zhruba 100000,- Kč respektive 60000,- Kč za stavebnici. 3D tiskárna B9 Creator je zobrazena na Obr. 12. [12]



Obr. 12: 3D tiskárna B9 Creator [12]

### 3.4.3 Ilios HD SLA 3D Printer

3D tiskárnu Ilios HD SLA 3D Printer vyvíjí Demetris Ruslan Zavorotnitsienko. Zařízení je modulární se širokými možnostmi přizpůsobení dle požadavků zákazníka. K vytváření fotopolymeru je použit DLP projektor, je zde i možnost použít dvou projektorů najednou k plnému využití pracovního prostoru stroje s lepší přesností v osách X a Y. Pracovní prostor má rozměry 300 x 300 x 200 milimetrů. Opakovatelná přesnost osy Z je 0,01 mm. Cena zařízení začíná na 2805,00 € za stavebnici bez pohonů, řízení a projektoru. To odpovídá zhruba 77000,- Kč při kurzu eura z května 2014. Cena za sestavenou 3D tiskárnu vybavenou projektorem, velkou nádrž na fotopolymer se systémem oddělování vrstvy ode dna posunem nádrže a sesmýknutím přes hranu, dále delší osou Z se zdvihem maximálně 380 mm, pohonem os krokovými motory a systémem řízení krokových motorů je pak 5857,00 €. Cena za kompletní zařízení je tak zhruba 161000,- Kč. [13]



*Obr. 13: 3D tiskárna Ilios HD SLA 3D Printer [13]*

### 3.4.4 3D Systems ProJet® 1200

3D Systems ProJet® 1200 je malá stolní 3D tiskárna využívající laserovou technologii SLA. Pracovní prostor má velikost 43 x 27 x 150 mm. Rozlišení v osách X a Y je 56 mikronů. Tloušťka vrstvy je 0,03 milimetru a rychlost stavby modelu v ose Z je 14 milimetrů za hodinu. Tiskárna staví modely z přímo pro ni určeného materiálu VisiJet FTX Green, což je UV vytvrditelný fotopolymer. Hlavní výhodou této 3D tiskárny jsou její vnější rozměry pouze 230 x 230 x 356 milimetrů a hmotnost pouze 9 kilogramů. Maloobchodní cena zařízení je \$4,900, což odpovídá zhruba 98000,- Kč (při kurzu amerického dolaru z května 2014). [14]



*Obr. 14: 3D Systems ProJet® 1200 [14]*



### 3.4.5 Formlabs The form 1

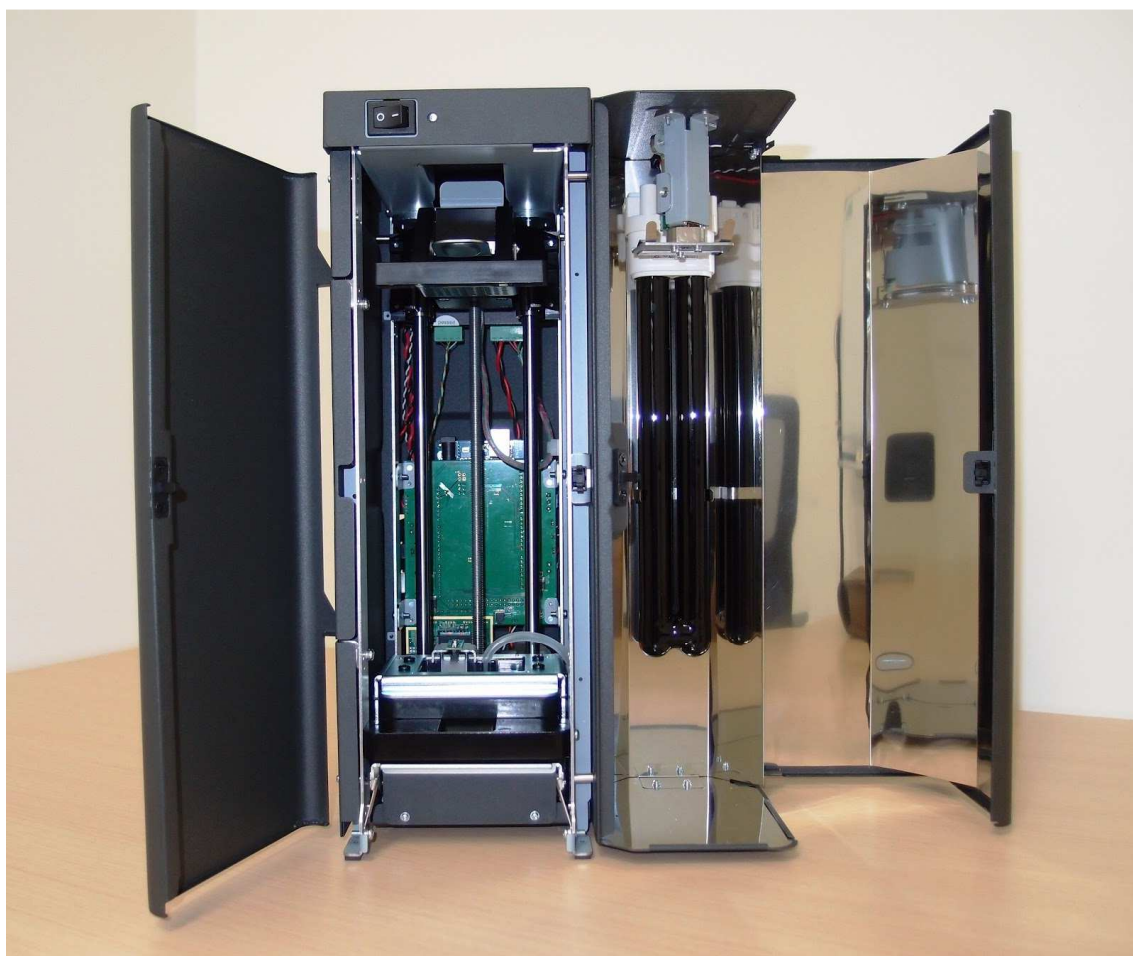
Jde o další stolní 3D tiskárnu technologie SLA s vytvrzováním laserem s vlnovou délkou 405 nm. Tiskárna disponuje pracovním prostorem 125 x 125 x 165 milimetrů, který patří stejně jako v předchozím případě k těm menším. Fotopolymer je zde také ozařován zespodu skrze dno nádrže a platforma s modelem stoupá vzhůru nad hladinu fotopolymeru. Laser dokáže vytvrzovat nejmenší objekty o rozměru 300 mikronů a vrstvy je možné dělat 25, 50 nebo 100 mikronů tlusté. Vnější rozměry tiskárny jsou 30 x 28 x 45 centimetrů a hmotnost tiskárny je 8 kilogramů. Maloobchodní cena této tiskárny je €2799, což je při kurzu eura vůči koruně platném z května 2014 přibližně 77000,- Kč. Firma Formlabs tiskárnu nabízí jako kompletní balíček a k tiskárně nabízí i svoji vlastní řadu stavebních materiálů. [15]



*Obr. 15: 3D tiskárna Form labs The form 1 [15]*

### 3.4.6 MiiCraft 3D Printer

Stejně jako ve dvou předchozích případech je i tato 3D tiskárna ve stolním provedení. Vnější rozměry tiskárny jsou 20,5 cm na šířku, 20,8 cm hloubka a 33,5 cm výška, hmotnost je pod 6,5kg. Pracovní prostor má ale rozměry jen 43 x 27 x 180 mm. Rozlišení v rovině XY je 56 mikronů, v ose Z je pak 50 mikronů. Rychlost stavby v ose Z je pak 2 centimetry za hodinu při tloušťce vrstvy 50 mikronů nebo 3 centimetry za hodinu při tloušťce vrstvy 100 mikronů. K vytvrzování tiskárna používá Pico DLP projektor. Zajímavostí této tiskárny je systém automatického doplňování fotopolymeru do stavební nádrže ze zásobníku. Cena tiskárny MiiCraft 3D Printer je \$1999, což je v přepočtu na koruny 39980,- Kč (dle kurzu platném v květnu 2014). Tiskárna MiiCraft 3D Printer je zobrazena na obr. 16, na kterém je patrný pracovní prostor pod otevřeným krytem na levé straně a odkrytovaný zásobník s fotopolymerem na straně pravé. [16]



*Obr. 16: MiiCraft 3D Printer [16]*

### 3.4.7 Přehledová tabulka parametrů dostupných 3D tiskáren

Zařízení	Použitá metoda	Tloušťka vrstvy [mm]	Rozměry pracovního prostoru [mm]	Nejmenší velikost vyrobitelného prvku [mm]	Orientační cena zařízení [Kč]
<b>Pegasus Touch Laser SLA 3D Printer</b>	SLA	0,025-0,1	177x177x228	0,25	70000,-
<b>B9 Creator</b>	DLP	0,1	102x76x203	0,1	100000,-
<b>Ilios HD SLA 3D Printer</b>	DLP	0,0125	300x300x200		161000,-
<b>3D Systems ProJet® 1200</b>	SLA	0,03	43x27x180	0,056	98000,-
<b>Formlabs The form 1</b>	SLA	0,025	125x125x165	0,3	77000,-
<b>MiiCraft 3D Printer</b>	Pico DLP	0,05	43x27x180	0,056	40000,-

*Tab. 1: Přehledová tabulka parametrů konkurenčních 3D tiskáren*

## 4 Stavební materiál

Stavební materiálem pro technologii 3D DPL tisku jsou fotopolymery, neboli zářením vytvrditelné pryskyřice. Fotopolymery byly vyvinuty v šedesátých letech minulého století a rozšířily se hlavně v tiskařském průmyslu jako povlakový materiál a dále v zubařství jako zubní výplně. V těchto aplikacích nebylo nutné materiál nijak přesně formovat ani tvarovat a přesně řídit ozařovací paprsek. To se změnilo s příchodem stereolitografie v osmdesátých letech minulého století, když Charles Hull experimentoval s ozařováním UV vytvrditelných materiálů laserem, došel k závěru, že lze tímto způsobem vrstvu po vrstvě vytvořit pevný 3D objekt. Většina fotopolymerů reaguje na ultrafialové záření, existují ale i systémy reagující na viditelné světlo. Tři základní složky fotopolymerů jsou fotoiniciátor, fotoinhibitor a monomery a oligomery. Monomery a oligomery plní funkci stavebního materiálu tím, že chemickou reakcí spolu zesílují a tím vytvoří pevný materiál. K nastartování reakce slouží fotoiniciátor, který ji zahájí, když přijme dostatečné množství energie z absorbovaného záření. Fotoinhibitor naopak reakci utlumuje, díky tomu je snadné kontrolovat tloušťku vytvrzené vrstvy parametry ozařování. [1]

Fotopolymery lze rozdělit do tří skupin:

- Akryláty: Jedná se o starší materiály, které mají větší smrštitivost. Součásti stavěné z těchto materiálů pak mají menší přesnost.
- Epoxidy: Modernější materiály s malou smrštitivostí.
- Plněné pryskyřice: Jsou vyplňované organickými materiály, keramikou nebo kovy. Materiály vhodné pro praktické použití, například pro kusovou výrobu složitých součástí. Snášejí vyšší namáhání.

Fotopolymerizaci je možné rozdělit na 5 fází:

- Fotoiniciátor je smíchán s monomerem
- Fotonické buzení a volné radiální generování
- Řetězové zahájení
- Řetězové šíření
- Řetězové ukončení

Existují dva druhy fotopolymerizací, těmi jsou Fotopolymerizace volných radikálů, kterou se váží akryláty a Katodická fotopolymerizace, tou se váží epoxidy a plněné pryskyřice. [2]

## **4.1 Přehled stavebních materiálů**

### **4.1.1 EnvisionTEC**

Firma EnvisionTEC GmbH nabízí řadu materiálů primárně určenou pro své portfolio SLA 3D tiskáren z řad Ultra® a Perfactory®. Ovšem použití pro navrhovanou 3D DLP tiskárnu by mělo být možné bez problémů. Jde o materiály:

#### **HTM140**

Zkratka HTM znamená High Temperature Mold Material. Tedy materiál s vysokou teplotní odolností, která je 140°C. Pevnost v tahu je pak 56 MPa. Materiál má zelenou barvu. Popřípadě pod označením HTM140IV je dostupný v barvě slonoviny.

#### **ABflex a ABS-tuff**

Jde o materiály s vlastnostmi podobnými ABS. ABflex je materiál pro výrobu modelů, po kterých je požadována určitá pružnost. Jeho pevnost v tahu je 28,6 MPa, modul pružnosti 1400 MPa jeho tvrdost je Shore D 77. ABS-tuff má pak mez pevnosti v tahu 48,6 MPa, modul pružnosti 2100 MPa a tvrdost Shore D 83.

#### **E-Denstone 3SP™**

Materiál primárně určený pro modely zubních náhrad. Má barvu slonové kosti nebo oranžovou. Pevnost v tahu je 56 MPa, modul pružnosti je 3350 MPa a odolává teplotám do 140°C.

#### **RC31**

RC31 je materiál plněný nanočásticemi vhodný pro výrobu krytů a výrobu dílů pro použití v elektronice. Je v oranžovém barevném provedení, má vysoký modul pružnosti 3860 MPa, tvrdost pak je Shore D 93,1 a mez pevnosti v tahu je 35,4 MPa.

#### **RC25**

Materiál plněný nanočásticemi pro tvorbu velkých a tuhých modelů, typicky tvorba modelů hliníkových odlitků pro automobilový průmysl. Materiál má oranžovou barvu, pevnost v tahu 46 MPa, modul pružnosti 3860 MPa, tvrdost Shore D 93,1.

#### **Photosilver (RCP130)**

Jde o materiál plněný keramickými částicemi. Materiál je určen pro stavbu velmi detailních a tvarově složitých modelů. Má šedo-stříbrný odstín.

## LS600

LS600 je extrémě odolný fotopolymer, který má pevnost v tahu 1800 MPa. Tvrdost dosahuje hodnoty Shore D 85.

## E-Shell

E-Shell je speciální materiál vyvinutý pro výrobu naslouchátek, modely zvukovodů a podobných modelů s požadavky na akustiku.

Parametry jednotlivých materiálů EnvisionTEC dle [17].

### 4.1.2 Formlabs Resin

Materiál je vyvinutý pro 3D tiskárnu Form labs The form 1, ale je použitelný i pro DLP technologii. Vyrábí se ve třech provedeních lišících se barvou, konkrétně se jedná o čirý, šedý a bílý materiál. Mez kluzu v tahu vytvrzeného materiálu je 29,8 MPa. Materiál je prodáván v balení po jednom litru a cena takového balení je €125.00 [18], což je v přepočtu podle kurzu dolaru ke koruně z května 2014 zhruba 3440,- Kč.



*Obr. 17: stavební materiál Formlabs Resin [18]*

### 4.1.3 SEDGWICK™ UV Cured Acrylic based Resin

Jde o namíchanou směs fotoinciátoru, akrylátového monomeru a fotoinhibitoru. Materiál je vhodný pro vytvrzování DLP projektorem. Vytvrzení vrstvy 0,1mm

projektorem se svítivostí 2700 lumenů trvá dvě až čtyři vteřiny. Materiál je netoxický s nízkým rizikem podráždění pokožky a má lehký zápach. V tekutém stavu má nízkou viskozitu 80 až 120 mPa.s při teplotě 20°C. Tvrdost po vytvrzení je 70 až 75 Shore D. Cena za 1l balení je \$74.95 [19], což je v přepočtu dle kurzu dolaru z května 2014 zhruba 1500,- Kč.



*Obr. 18: SEDGWICK™ UV Cured Acrylic based Resin [19]*

#### **4.1.4 Spot-A materials**

Spot-A materials je obchodní značka firmy Sonnaya Ulitka S.L. se sídlem ve španělské Barceloně. Pod touto značkou je produkována celá řada materiálů. Jedná se jednak o řadu univerzálních fotopolymerů, které jsou použitelné v jakékoliv 3D tiskárně stavějící z fotopolymerů a využívající k vytvrzování DLP projektorů, UV lamp či laserů s vlnovou délkou maximálně 425 nm a výkonem minimálně 80 mW. Konkrétně to jsou materiály:

##### **Spot-GP**

Univerzální materiál pro obecné použití. Hustota, která je podobná u všech materiálů Spot-A, je 1 až 1,1 g/ml. Cena materiálu €68.00 za 1kg balení a €323.00 za 5kg balení. To odpovídá zhruba 1870,- Kč za 1kg, respektive 8883,- Kč za 5kg balení.

### **Spot-HT**

Materiál pro náročnější aplikace. Po vytvrzení má podobné vlastnosti jako ABS. Oproti Spot-GP vyniká model vytvořený z materiálu Spot-HT větší tvrdostí, jeho povrch je odolnější proti opotřebení a nárazům a má i zvýšenou odolnost proti chemikáliím a vodě. Model vytvořený z materiálu Spot-HT dlouhodobě snáší teplotní zatížení do 100°C. Cena materiálu je €72.00 za 1kg balení a €342.00 za 5kg balení, v přepočtu na koruny dle kurzu z května 2014 to je 1980,- Kč za 1kg balení respektive 9405,- Kč za 5kg balení.

### **Spot-LV**

Materiál vlastnostmi obdobný materiálu Spot-GP, má ale ještě sníženou viskozitu, která je nižší než 50 mPa.s. Materiál je také velmi čirý, což umožňuje tisknout modely připomínající sklo či plexisklo. Materiál se prodává pouze v 1kg balení, jehož cena je €72.00, v přepočtu dle kurzu České koruny vůči Euru z května 2014 to je 1980,- Kč.

### **Spot-E**

Spot-E je elastický materiál, který po vytvrzení má vlastnosti blízké se gumě. Tvrdost je po vytvrzení Shore A60 nebo Shore A75. Materiál se prodává v 1kg nebo 5kg balení. Cena je €78.00 respektive €370.00, to hruba odpovídá 2145,- Kč za 1kg respektive 10175,- Kč za 5kg balení.

Materiály je možné barvit buď pigmenty nebo barvivy. S pigmentem je dosaženo neprůhledného materiálu, naopak s barvivy je materiál transparentní s požadovaným barevným tónem. Pigmenty jsou dostupné: zelený, modrý, bílý, černý, červený a žlutý. Zelený a modrý je prodáván v 20g balení s cenou €5.00 (138,- Kč), 20g balení bílého pak stojí €4.00 (110,- Kč), černý červený a žlutý jsou pak v 15g balení v ceně €6.50 (179,- Kč). Barviva jsou pak zelená, modrá, černá, červená, oranžová a žlutá. Všechna barviva jsou v 20g balení v ceně €5.00 (138,- Kč) s výjimkou černého, které stojí €4.00 (110,- Kč).



Pod značkou Spot-A materials je rovněž nabízena řada materiálů, jejichž vlastnosti jsou vyladěny pro použití v konkrétní 3D tiskárně. Tam patří materiály:

#### **Spot-GP for B9Creator and similar**

Jde o materiál Spot-GP optimalizovaný pro použití v 3D tiskárně B9 Creator a jiných tiskárnách používajících DLP projektor a PDMS antiadhezní vrstvu v nádrži. Prodává se pouze v 1kg balení s předem namíchaným žlutým pigmentem. Cena balení je €70.00, což je zhruba 1925,- Kč za 1kg tohoto stavebního materiálu.

#### **Spot-HT for B9Creator and similar**

Vlastnostmi stejný jako Spot-HT, ale optimalizovaný pro použití v 3D tiskárně B9 Creator a jiných tiskárnách používajících DLP projektor a PDMS antiadhezní vrstvu v nádrži. Prodává se stejně jako Spot-GP for B9Creator and similar pouze v 1kg balení namíchaný se žlutým pigmentem. Cena balení je €74.00, což je zhruba 2035,- Kč za 1kg.

#### **Spot-GP – Form1**

Jde o materiál Spot-GP optimalizovaný pro 3D tiskárnu Formlabs The form 1 technologie SLA. Prodává se pouze v 1kg balení v ceně €82.00 (2225,- Kč) za čiré provedení a €84.00 (2310,- Kč) za neprůhledné bílé provedení.

#### **Spot-HT – Form1**

Materiál Spot-HT vyladěný pro 3D tiskárnu Formlabs The form 1. Dostupný je v 1kg balení v čirém provedení za cenu €88.00 (2420,- Kč) nebo v bílém neprůhledném provedení za cenu €90.00 (2475,- Kč).

#### **Spot-GP – Etec Perfactory, Aureus**

Materiál Spot-GP, který je kompatibilní s profesionální 3D tiskárnou od firmy EnvisionTEC z řady Perfactory Aureus. Cena je €140.00 za 1kg materiálu (3850,- Kč).

#### **Spot-HT – Etec Perfactory, Aureus**

Materiál Spot-HT kompatibilní s 3D tiskárnou od firmy EnvisionTEC z řady Perfactory Aureus. Cena materiálu je €180.00 za 1kg materiálu (4950,- Kč).

#### **Spot-GP – MiiCraft**

Stavební materiál Spot-GP optimalizovaný pro 3D tiskárny MiiCraft. Cena materiálu je €145.00 (3990,- Kč) za 1kg.

### **Spot-HT – MiiCraft**

Materiál Spot-HT optimalizovaný pro 3D tiskárny MiiCraft. Cena materiálu je €165.00 (4538,-Kč) za 1kg.

### **Spot-LV – MiiCraft**

Stavební materiál s nízkou viskozitou Spot-LV optimalizovaný pro 3D tiskárny MiiCraft. Cena materiálu je €160.00 (4400,- Kč) za 1kg.

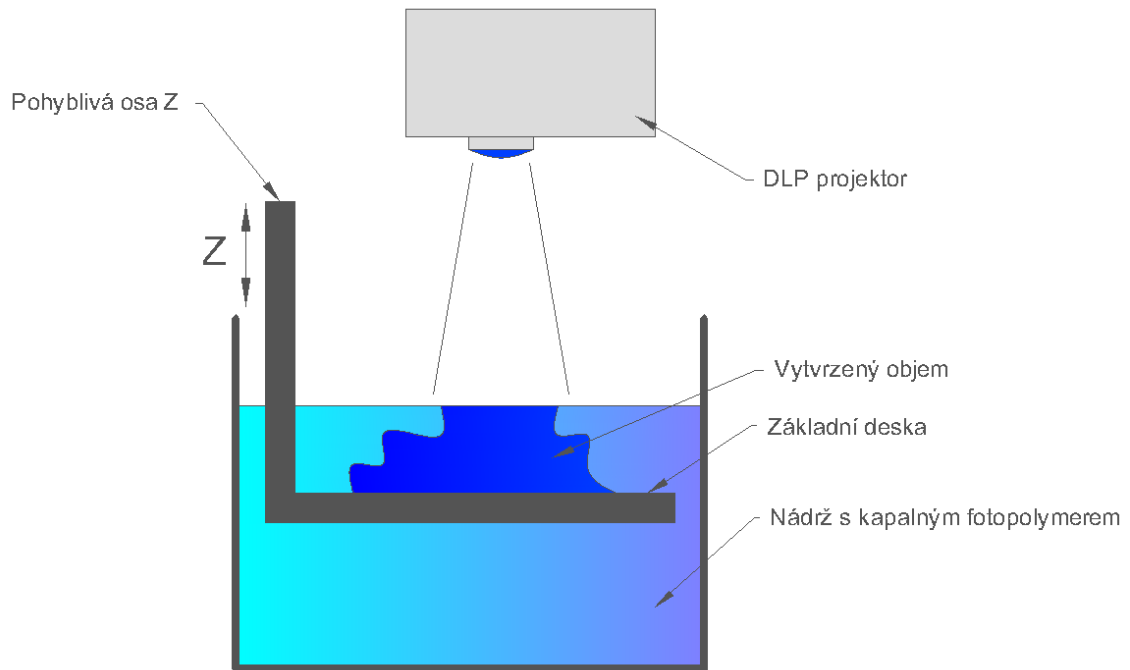
Pro použití ve 3D DLP tiskárně, kterou se zabývá tato diplomová práce jsou ideální materiály Spot-A určené pro B9 Creator. Ten reaguje na záření o vlnových délkách 385 až 425 nm. Pro tento materiál udává výrobce dobu expozice základních vrstev je od 10 do 18 vteřin a expozice dalších vrstev pak 3 až 10 sekund podle výkonnosti použitého projektoru. Tyto hodnoty platí pro nastavené XY rozlišení na 0,05mm na pixel a tloušťku vrstvy 0,1mm, při XY rozlišení 0,1mm se hodnoty expozice násobí 2x. Uvedené parametry materiálů Spot-A odpovídají [20].



*Obr. 19: Spot-GP for B9Creator and similar [20]*

## 5 Volba koncepce tiskárny

### 5.1 Uspořádání s projektorem nad vanou s fotopolymerem



Obr. 20: Uspořádání s projektorem nad vanou

U této koncepce osvětluje projektor hladinu fotopolymeru a zde dochází k vytvrzování vrstvy. Po vytvrzení se vrstva potápí pod hladinu, tím dojde k jejímu zalití tekutým fotopolymerem a je možné vytvrzovat další vrstvu. Ke stavbě objemu tedy dochází pod hladinou.

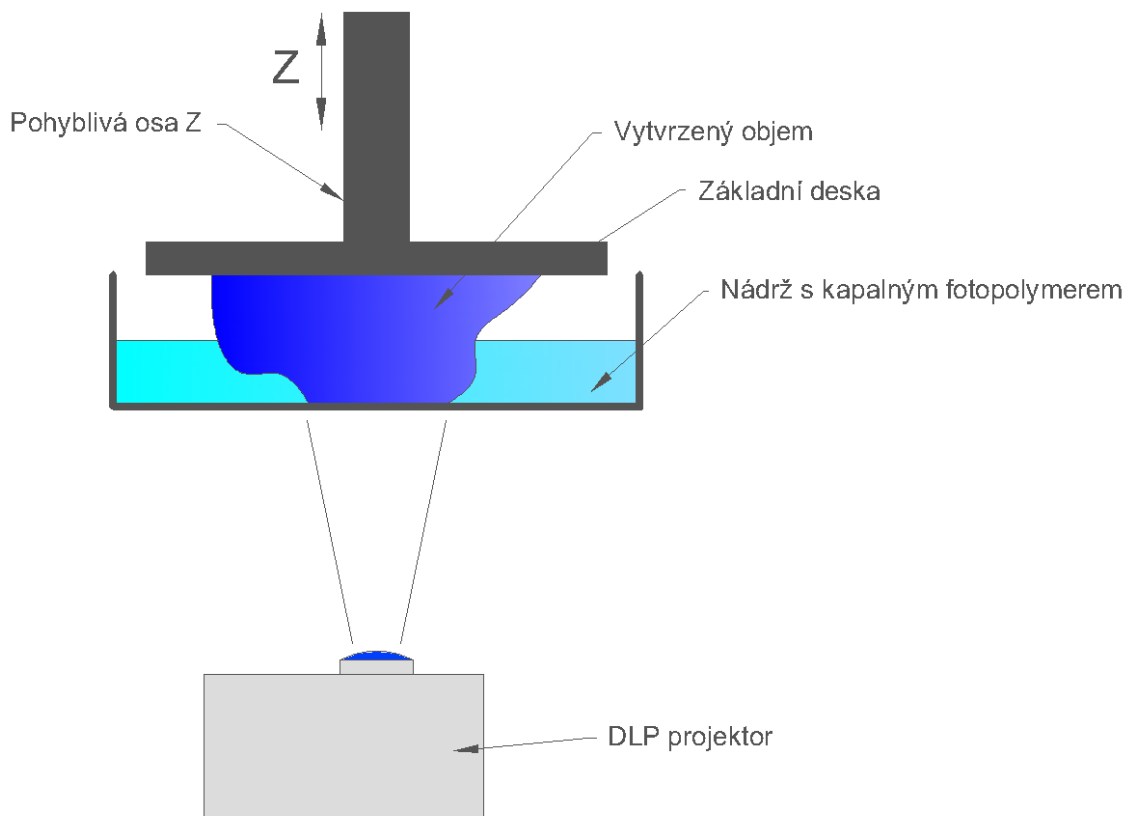
Výhody: -objem je vytvrzován na volné hladině fotopolymeru – nedochází ke srůstům a přisátí vytvrzeného objemu s nádrží

Nevýhody: -je nutné udržovat vysokou hladinu fotopolymeru v nádrži, minimálně ve výši stavěného objektu

-vlivem potápění držáku základní desky dochází ke změně výšky hladiny a tím i posunutí roviny, kde dochází k vytvrzování fotopolymeru – vzniká nepřesnost v ose Z

- při stavbě dutého uzavřeného tělesa zůstává v dutině nevytvřené fotopolymer

## 5.2 Uspořádání s projektorem pod vanou s fotopolymerem



Obr. 21: Uspořádání s projektorem pod vanou

Zde projektor ozařuje fotopolymer v nádrži přes její dno. Na dně nádrže tedy dochází k vytvrzení vrstvy, která se spojí s již vytvrzeným objemem.

Výhody: -výška stavěného objemu není limitována výškou hladiny fotopolymeru v nádrži – není zapotřebí udržovat vysokou hladinu fotopolymeru

-konstantní vzdálenost vytvrzovací roviny od projektoru

-nedochází ke kolísání hladiny vlivem potápění držáku základní desky, které by způsobovalo nepřesnost v ose Z

Nevýhody: -dochází k přisátí nově vytvrzené vrstvy ke dnu nádrže – k eliminaci tohoto jevu je zapotřebí přidat další pohyb – složitější, dražší a rozměrnější konstrukce celé tiskárny

### **5.3 Zvolení koncepce tiskárny**

Rozhodl jsem se použít koncepci s projektorem pod nádrží. Tato koncepce je sice náročnější na konstrukci samotné tiskárny, ale má potenciál k produkci modelů vyšší jakosti než koncepce s projektorem nad nádrží s fotopolymerem a vytvrzování vrstvy na hladině fotopolymeru. Další významným kladem zvolené koncepce je, že při stavbě vyšších modelů není nutné mít v nádrži vysokou hladinu a tím i velké množství drahého fotopolymeru. Tím je zamezeno znehodnocování fotopolymeru, který dlouhým skladováním v nádrži postupně nedegraduje a pokud je potřeba vyměnit materiál za jiný, tak není pro stavbu malého modelu potřeba hned nakupovat fotopolymer v objemu celé nádrže, ale stačí pouze množství materiálu v objemu modelu + rezerva na minimální zbytek fotopolymeru v nádrži.

## 6 Výběr projektoru

Projektor pro aplikaci v 3D DLP tiskárně musí splňovat několik požadavků. Na tyto požadavky projektory běžně nejsou navrhovány, a proto nelze v 3D DLP tiskárně použít libovolný projektor.

Prvním požadavkem je jeho vysoké rozlišení, to umožňuje dosáhnout buď vysoké přesnosti při dostačujícím pracovním prostoru, nebo pokud je požadován pracovní prostor větší, lze ho za cenu snížení přesnosti jednoduchým přenastavením zařízení dosáhnout. Závislost rozlišení, ceny projektoru, velikosti pracovního prostoru a přesnosti je patrná z tabulky 2.

rozlišení projektoru		poměr stran	orientační cena projektoru bez DPH od [Kč]	maximální velikost pracovního prostoru při velikosti bodu 0,2x0,2mm		maximální velikost pracovního prostoru při velikosti bodu 0,15x0,15m		maximální velikost pracovního prostoru při velikosti bodu 0,1x0,1mm		maximální velikost pracovního prostoru při velikosti bodu 0,05x0,05m	
x [bodů]	y [bodů]			x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1024	768	4:3	6 500	204,8	153,6	153,6	115,2	102,4	76,8	51,2	38,4
1280	800	16:10	7 500	256	160	192	120	128	80	64	40
1920	1080	16:9	14 000	384	216	288	162	192	108	96	54
4096	2160		244 000	819,2	432	614,4	324	409,6	216	204,8	108

Tab 2: Rozlišení projektorů, jeho vliv na přesnost v porovnání s cenou

Druhým požadavkem je vysoký podíl záření s vlnovou délkou 300 až 450 nm ve vyzařovaném spektru. Na záření v rozsahu těchto vlnových délek totiž reaguje většina fotoiniciátorů ve fotopolymerech a bez přítomnosti tohoto záření ve vyzařovaném spektru projektoru by po ozáření vrstvy fotopolymery nezačalo její vytvrzování. Tento požadavek je v rozporu s požadavky na běžné použití dataprojektorů, protože se jedná především o UV A záření, které je pro lidské oko škodlivé. Některé typy projektorů dnes používají UV filtrů ve výstupní optice, nebo používají LED lampy, které UV záření neemitují vůbec. Těmto typům projektorů je třeba se při výběru vyvarovat.

Třetím požadavkem na projektor je jeho schopnost zaostřit na malé vzdálenosti. To je opět v rozporu s běžným použitím dataprojektoru, který je navrhnut na promítání obrazu s úhlopříčkou větší než jeden metr na projekční vzdálenosti v řádech metrů. Zde se potřebujeme pohybovat v obou parametrech v řádu desítek centimetrů.

Z vývoje ceny vůči rozlišení je patrné, že optimální rozlišení pro tuto aplikaci je Full HD 1920x1080. Projektor s rozlišením 4k jsou v současné době příliš drahé a rozdíl ceny by neodpovídal zlepšení parametrů. Ovšem výměna projektoru za projektor s rozlišením 4k by mohla být provedena v budoucnu, až cena těchto projektorů klesne na přijatelnou úroveň.

Do výběru byly zahrnuty projektory BenQ W1080ST, BenQ W1300, Acer H6510BD a NEC PE401H. Na základě porovnání ceny, svítivosti a kontrastu projektorů a splnění potřebných požadavků na projektor kladených jsem zvolil projektor Acer H6510BD. Dalším důvodem pro výběr tohoto projektoru byla i skutečnost, že funkčnost tohoto projektoru pro aplikaci v 3D DLP tiskárně je ověřena díky použití v jiných projektech 3D DLP tiskáren.

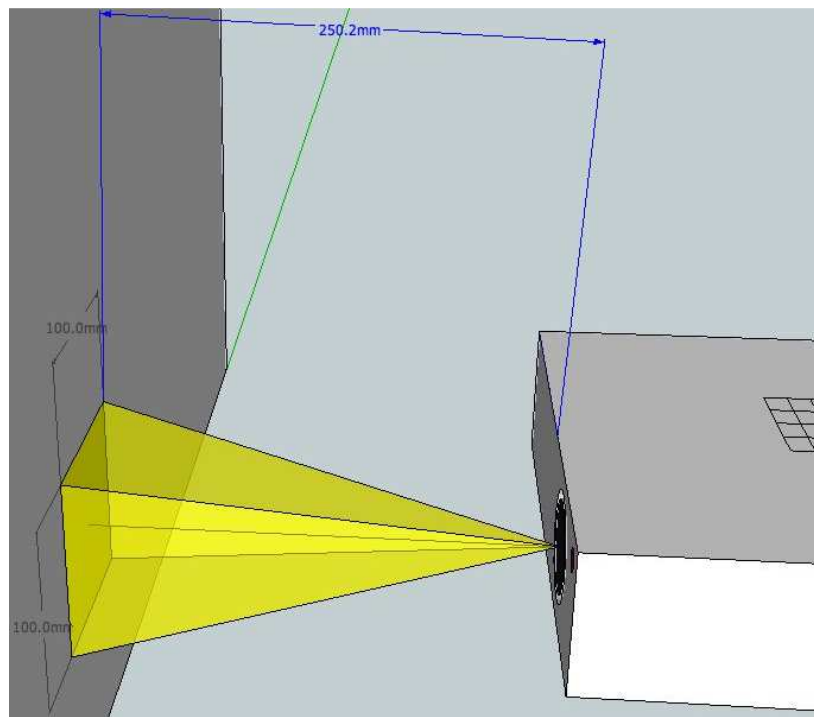


*Obr. 22: Projektor Acer H6510BD [21]*

S projektorem jsem rovněž provedl kontrolní měření, jímž byla zjištěna závislost velikosti pracovního prostoru na zaostřitelné projekční vzdálenosti, tato závislost je patrná v tabulce 3. Minimální zaostřitelnou vzdálenost projektoru od projekční roviny jsem naměřil 78mm. Při menších vzdálenostech projektoru od projekční roviny již nelze bez úprav výstupní optiky projektoru získat ostrý obraz. Technika měření projekční vzdálenosti je patrná z obr. 23.

Rozměr pracovního prostoru [mm]	XY rozlišení [mm/pixel]	Naměřené projekční vzdálenost [mm]
320 x 184 (maximum)	0,16	365
288 x 162	0,15	326
192 x 108	0,1	216
96 x 54	0,05	101

Tab. 3: Naměřené projekční parametry projektoru Acer H6510BD



Obr. 23: Technika měření projekční vzdálenosti [36]



## 7 Konstrukce nádrže fotopolymeru

Nádrž obsahuje tekutý fotopolymer, ten je vytvrzován ozařováním skrz její dno UV zářením z projektoru. Nová vrstva je tedy vytvrzována na dně nádrže, to s sebou nese několik požadavků na konstrukci nádrže:

- materiál dna nádrže musí být UV propustný
- povrch dna nádrže musí zajistit, aby se nově vytvrzená vrstva se dnem nespojila
- vyřešit problém s přisátím nové vrstvy a jejím odtržením ode dna

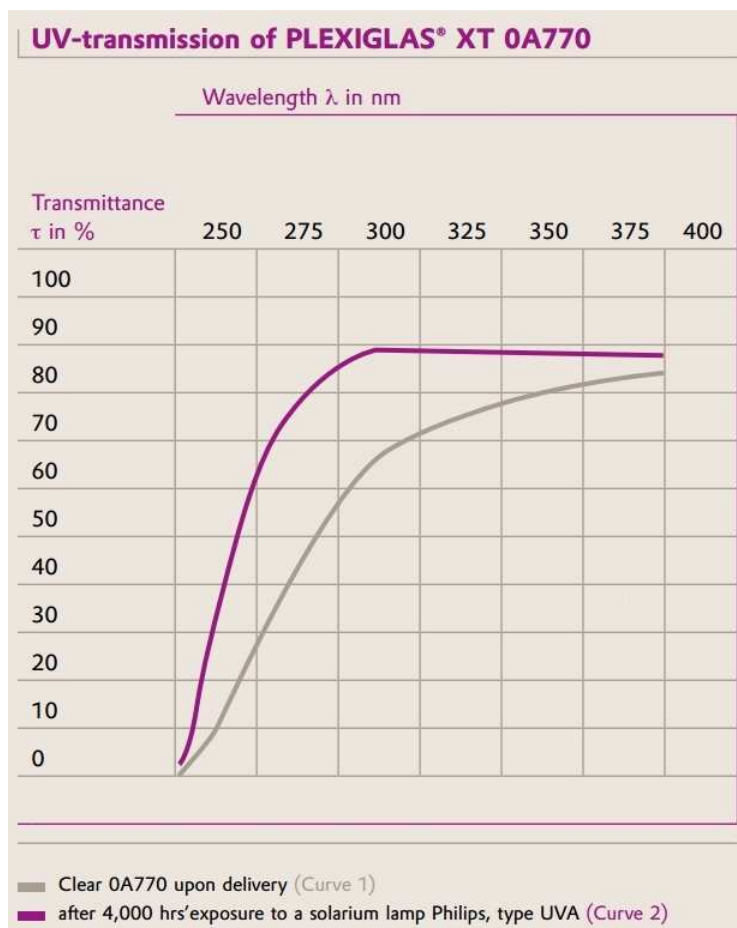
### a) UV propustný materiál

Aby vůbec došlo k vytvrzení vrstvy fotopolymeru, musí být fotopolymer dostatečně ozářen světlem v UV spektru. Z tohoto důvodu nelze ke stavbě nádrže použít běžné plexisklo, to totiž UV záření pohlcuje a propouští pouze světlo vlnových délek 400 nm a delších. Ze stejného důvodu není možné použít ani běžné příměsové sklo.

Požadavky na UV propustnost splňuje křemenné sklo tvořené  $\text{SiO}_2$ , opticky čisté křemenné sklo je ale obtížně sehnatelné v požadovaném rozměru 355x230, navíc cena jedné takové desky by byla v řádu několika tisíc korun.

Druhou možností jsou speciální typy plexiskel používaných především v soláriích, ty jsou navrženy tak, aby propouštěly UV A záření. UV A záření obsahuje i pro aplikaci v této 3D tiskárně nejzajímavější oblast vlnových délek kolem 350 nm. Jedním takovým plexisklem je PLEXIGLAS® XT 0A770. UV propustnost plexiskla PLEXIGLAS® XT 0A770 je patrná z obrázku Obr. 24.

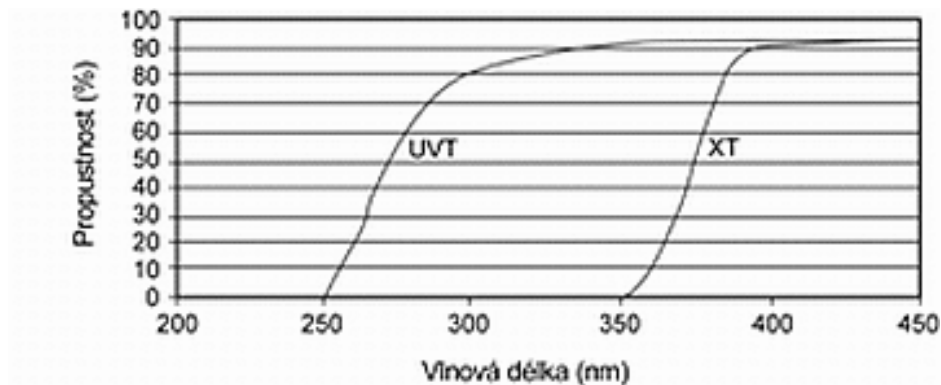
Dalším typem UV propustného plexiskla je plexisklo UVT SOLAR. Parametry tohoto plexiskla jsou patrné z tabulky Tab. 4. Propustnost v UV spektru jsou pak vyjádřeny v grafu viz. Obr. 25.



Obr. 24: UV propustnost plexiskla PLEXIGLAS® XT 0A770 [22]

Technické parametry			
Plexisklo UVT SOLAR	Metoda	Jednotka	Hodnota
Formát		mm	2050 x 3050
Tloušťka		mm	4
Hmotnost		kg/m <sup>2</sup>	4,8
Propustnost světla (mezi 290 až 380 nm)		%	> 90
Hustota		Kg/m <sup>3</sup>	1200
Modul pružnosti v tahu	ISO 527	MPa	3000
Teplota měknutí	ISO 306	°C	> 105
Maximální dlouhodobé teplotní zatížení		°C	70
Teplota zpracování za tepla		°C	160

Tab. 4: Parametry plexiskla UVT SOLAR [23]



Obr. 25: UV propustnost plexiskla UVT SOLAR [23]

Pro stavbu nádrže jsem zvolil plexisklo UVT SOLAR od společnosti TITAN-MULTIPLAST s.r.o. a to hlavně z důvodu dostupnosti v požadovaných formátech. U jiných typů UV propustných plexiskel by bylo nutné objednat celou desku ve formátu 2 x 3 m v ceně přibližně 15000,- Kč.

#### b) antiadhezní úprava dna nádrže

Při vytvrzování fotopolymeru na dně nádrže by se vytvrzená vrstva za běžných okolností spojila s materiálem dna nádrže a pak by ode dna nešla oddělit. Proto je dno nádrže nutné povlakovat materiálem, který se s vytvrzenou vrstvou fotopolymeru nespojí, ideálně nedojde k vytvrzení fotopolymeru, který je v bezprostředním styku s povlakem. Takových vlastností lze dosáhnout povlakováním dna nádrže polydimethylsiloxanem (PDMS). Funkčnost PDMS, jako antiadhezního materiálu pro 3D tiskárny využívající fotopolymerů, je ověřena praxí.

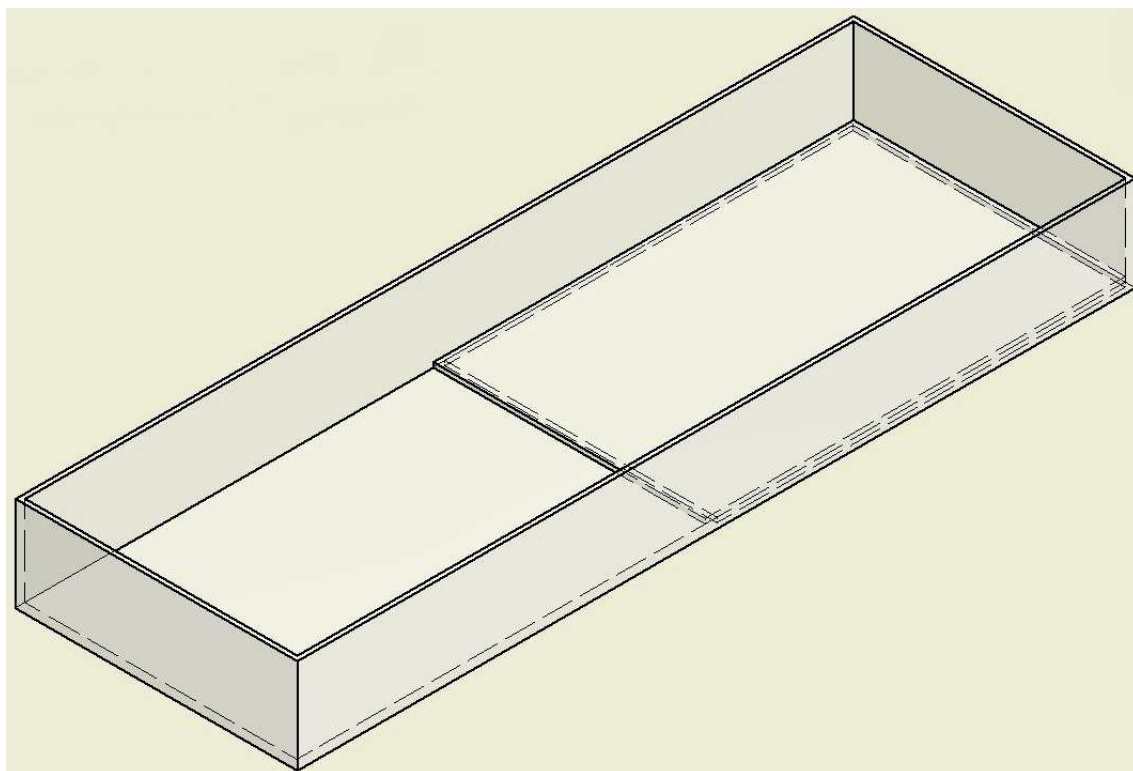
Pro povlakování dna nádrže jsem zvolil polydimethylsiloxan, konkrétně přípravek Dow Corning SYLGARD® 184. Jedná se o dvousložkový přípravek, který vyniká schopností vytvrzení za nízkých a pokojových teplot. Tato vlastnost je pro nás klíčová, protože vrstva z PDMS se bude vytvrzovat uvnitř nádrže z plexiskla, jehož maximální teplotní zatížení je 70°C.

### **c) problém přisátí vytvrzené vrstvy ke dnu nádrže**

Díky tomuto problému nelze při vytvrzování vrstvy o větší ploše tuto vrstvu oddělit ode dna nádrže prostým pohybem vzhůru. Při použití vyšší síly by mohlo dojít i k poškození již vystavěné součásti nebo poškození antiadhezního povlaku dna nádrže. Jev je způsoben tím, že po vytvrzení nové vrstvy zůstává mezi vrstvou a dnem nádrže příliš malá mezera na to, aby do ní mohl při oddělování lehce proniknout tekutý fotopolymer z okolí. Systém se chová jako přísavka. Je proto nutné přidat další pohyb k eliminaci tohoto problému. Problém lze řešit dvěma způsoby a to naklápěním nádrže nebo sesmýknutím přes hranu.

Při naklápění nádrže se vytvrzená vrstva ode dna odtrhává postupně. Tekutý fotopolymer tak vniká do postupně se rozevírající mezery mezi nádrží a vytvrzeným modelem. Tato metoda tak snižuje sílu na odtržení, ale problém úplně neodstraňuje. Při vytvrzování větších plných průřezů je zde stále riziko poškození jak modelu, tak povlaku dna nádrže.

Metoda smýkání přes hranu vyžaduje speciální větší nádrž s dvouúrovňovým dnem, to vytváří schod, ze kterého se nově vytvrzená vrstva vodorovným pohybem nádrže sesmýkne do volného objemu fotopolymeru. Zde již není problém model zvednout. Po návratu nádrže do výchozí polohy je možné s modelem opět sjet dolů tak, že mezi modelem a dnem nádrže zůstane vrstva tekutého fotopolymeru, která se bude dále vytvrzovat. Metoda zcela eliminuje problém přisátí, při pohybu nádrže ovšem na model působí boční síla způsobená obtékáním tekutého fotopolymeru okolo modelu. Při stavbě méně pevných modelů je tak vhodné snížit rychlost pohybu nádrže.



*Obr. 26: Skica nádrže na fotopolymer*

**Materiál potřebný k sestavení nádrže:**

- plexisklo UVT Solar ve formátech:

355 x 230 x 4 mm    2 ks

230 x 80 x 4 mm    2 ks

708 x 80 x 4 mm    2 ks

- lepidlo na plexisklo Acrifix 192

- antiadhezní materiál Sylgard 184 (PDMS)

Plexisklo a lepidlo bylo poptáváno u firmy TITAN-MULTIPLAST s.r.o., cena tohoto materiálu je 1198,- Kč včetně DPH. Cena antiadhezního přípravku Sylgard 184 je 1602,30,- Kč včetně DPH, zakoupen byl ze zahraničí přes Ebay.

## 8 Pohonné jednotky

### 8.1 Vertikální osa Z

Vertikální osa Z polohuje základní desku, na které roste model. Osa tedy zajišťuje zvedání vytvrzeného modelu a nastavuje je do polohy pro vytvrzení další vrstvy – nastavuje tloušťku vrstvy. Přesnost této osy tedy přímo ovlivňuje přesnost modelu v ose Z. Po ose je tak požadována vysoká opakovatelná přesnost a možnost krokování po až 0,01 mm. Požadovaný zdvih je 300 mm. Rozhodující parametry zatížení vzhledem k tomu, že osa bude orientována vertikálně, jsou síla v ose šroubu  $F_0 \geq 120 \text{ N}$  a moment  $M_A(M_X) \geq 24 \text{ N.m}$  vznikající uložením zátěže na rameni mimo osu šroubu.

#### HIWIN KK50

Lineární jednotka s valivým kuličkovým vedením a kuličkovým šroubem. Vyrábí se v délkách zdvihu od 150 mm po 300 mm. Opakovatelná přesnost je  $\pm 0,01$  mm a maximální rychlost posuvu je 270 mm/s. Šroub má průměr 8 mm a stoupání 2 milimetr na otáčku. Nabízená cena jednotky je 13403,- Kč bez DPH.

##### Dovolené namáhání KK-modulů

		KK5002
		P*
<b>Kuličkový šroub</b>		
Jmenovitý průměr [mm]		8
Stoupání [mm]		2
Dynamická únosnost [N]		2136
Statická únosnost [N]		3489
<b>Lineární vedení</b>		
Dynamická únosnost [N]	standardní vozík A krátký vozík S	8007 –
Statická únosnost [N]	standardní vozík A krátký vozík S	12916 –
Dovolený statický moment $M_x$ [Nm]	standardní vozík A1 standardní vozík A2 krátký vozík S1 krátký vozík S2	116 278 – –
Dovolený statický moment $M_y$ [Nm]	standardní vozík A1 standardní vozík A2 krátký vozík S1 krátký vozík S2	116 278 – –
Dovolený statický moment $M_o$ [Nm]	standardní vozík A1 standardní vozík A2 krátký vozík S1 krátký vozík S2	222 444 – –



Tab. 5: Lineární jednotka HIWIN KK50 a její parametry [24]

Typ	Délka dráhy [mm]	Opakovatelnost [mm]		Přesnost [mm]		Osová tolerance [mm]		Rozběhový moment [Nmm]	
		P*	C**	P*	C**	P*	C**	P*	C**
KK50	150	±0,003	±0,01	0,020	-	0,010	-	40	20
	200	±0,003	±0,01	0,020	-	0,010	-	40	20
	250	±0,003	±0,01	0,020	-	0,010	-	40	20
	300	±0,003	±0,01	0,020	-	0,010	-	40	20

\* P = Přesný KK-modul  
\*\* C = Normální KK-modul

Tab. 6: Parametry přesnosti jednotky KK50 [24]

### HENNLICH THK SKR 33

Lineární jednotka s valivým kuličkovým vedením a kuličkovým šroubem obdobné konstrukce jako jednotka HIWIN KK50. Oproti ní má ale kuličkový šroub o větším průměru a stoupání 6 mm/ot, tím je dosažena přibližně dvojnásobná únosnost šroubu. Vedení samotné vyniká vyšší únosností.

Model No.			SKR20		SKR26		SKR33*			SKR46*	
			SKR2001	SKR2006	SKR2602	SKR2606	SKR3306	SKR3310	SKR3320	SKR4610	SKR4620
LM guide unit	Basic dynamic load rating C (N)	Long type block	6010		13000		17000			39500	
		Short type block	—		—		11300			—	
	Basic static load rating C <sub>0</sub> (N)	Long type block	8030		16500		20400			45900	
		Short type block	—		—		11500			—	
	Radial clearance (mm)	Normal grade, high accuracy grade	-0.004 to 0		-0.006 to 0		-0.004 to 0			-0.006 to 0	
		Precision grade	-0.006 to -0.004		-0.007 to -0.006		-0.012 to -0.004			-0.016 to -0.006	
Ball screw unit	Basic dynamic load rating C <sub>a</sub> (N)	Normal grade, high accuracy grade	660	860	2350	1950	4400	2700	2620	4350	4240
		Precision grade	660	1060	2350	2390					
	Basic static load rating C <sub>0a</sub> (N)	Normal grade, high accuracy grade	1170	1450	4020	3510	6290	3780	3770	6990	7040
		Precision grade	1170	1600	4020	3900					
	Screw shaft diameter (mm)		6		8		13			15	
	Ball Screw lead (mm)		1	6	2	6	6	10	20	10	20
	Thread minor diameter (mm)		5.3	5.0	6.6	6.7	10.8			12.5	
	Ball center-to-center diameter (mm)		6.15	6.3	8.3	8.4	13.5			15.75	
Bearing unit (Fixed side)	Axial direction	Basic dynamic load rating C <sub>a</sub> (N)	1150		2000		6250			6700	
		Static permissible load P <sub>0a</sub> (N)	735		1230		2700			3330	

Tab. 7: Dovolené zatížení jednotky SKR3306 [25]

Model No.	Static permissible moment		
	$M_A$	$M_B$	$M_C$
SKR33-A	173	173	424

Tab. 8: Přípustné zatěžující momenty vozíku jednotky SKR3306 [25]



Obr. 27: Jednotka SKR od japonské firmy THK [25]

### HENNLICH THK VLA ST 60

Jedná se o ekonomickou alternativu k jednotkám SKR a KR. Hlavní rozdíl je v uložení vozíku, kde se kuličky vozíku neodvalují po vnitřním vedení profilu, ale pouze po jedné středové kolejnici, která je upevněna uvnitř Al profilu. Tato koncepce má za následek menší únosnost vedení. Pohon vozíku je pomocí kuličkového šroubu. Oproti jednotkám SKR a KR má také horší opakovatelnou přesnost polohování.



Obr. 28: Jednotka VLA ST 60 [26]



Model No.	Unit	VLA45 (30W)		VLA60 (50W)		VLA60 (100W)		
		High speed type	Medium speed type	High speed type	Medium speed type	High speed type	Medium speed type	
Rated speed <sup>(Note 1)</sup>	mm/s	600	300	600	300	600	300	
Maximum speed	mm/s	Stroke: 300 or less	1000	500	1000	500	1000	500
		Stroke: 350	1000	500	800	400	800	400
		Stroke: 400	1000	500	800	400	800	400
		Stroke: 450	840	420	800	400	800	400
		Stroke: 500	680	340	800	400	800	400
		Stroke: 550		800	400	800	400	
		Stroke: 600		680	340	680	340	
Stroke: 700	500	250		500	250			
Rated thrust	N	40	80	67	133	134	267	
Maximum thrust	N	117	235	201	402	398	796	
Maximum acceleration	G	0.3						
Horizontal mass capacity	kg	5	10	8	16	16	30	
Vertical mass capacity	kg	1.5	3	2.5	5	5	10	
Ball screw shaft diameter	mm	8		12				
Ball screw lead	mm	12	6	12	6	12	6	
Motor wattage <sup>(Note 3)</sup>	W	30		50		100		
Motor rated torque <sup>(Note 3)</sup>	N-m	0.095		0.159		0.319		
Positioning repeatability	mm	±0.02						
Backlash	mm	0.1						
Permissible moment	N-m	Ma=Mb=12 Mc=31		Ma=Mb=25.7 Mc=58				
Service life in distance traveled <sup>(Note 2)</sup>	km	5000						

Tab. 9: Parametry jednotky VLA ST 60 [26]

## HENNLICH THK KR 33

Jednotka THK KR33 je ekonomičtější provedením jednotky SKR33, oproti ní má menší únosnosti jak šroubu tak i samotného vedení. I tyto snížené parametry jsou však pro danou aplikaci dostatečné se značnou rezervou. V ohledech zástavbových rozměrů je s jednotkou SKR33 totožná.



Obr. 29: Jednotky THK z řady KR [27]

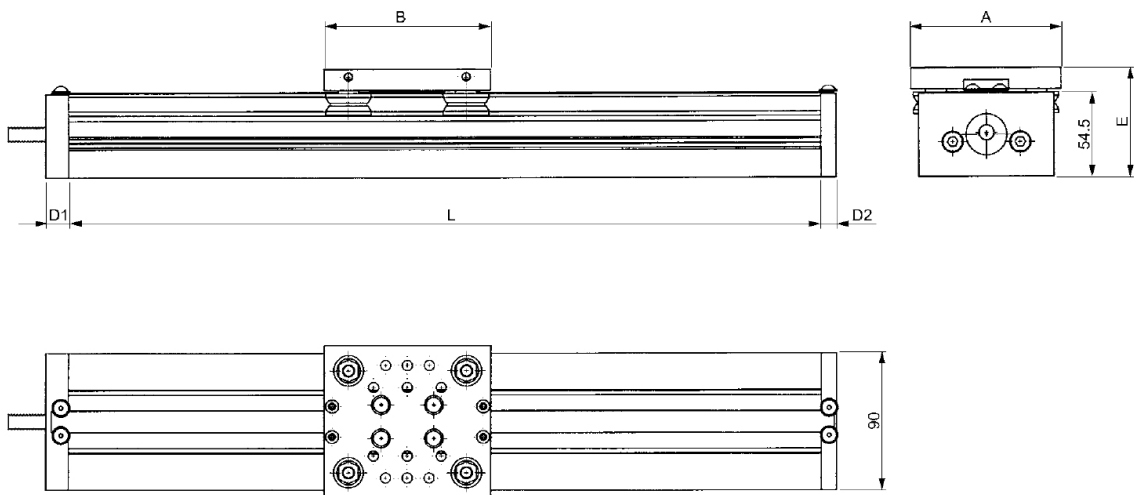
Model		KR15		KR20	KR26	KR30H		KR33		KR45H		KR46		KR55	KR65	
		KR1501	KR1502			KR30H06	KR30H10	KR3306	KR3310	KR45H10	KR45H20	KR4610	KR4620			
LM Guide	Basic dynamic load rating C (N)	Long nut block, types A and B	1930	3590	7240	11600		11600		23300		27400		38100	50900	
		Short nut block, types C and D	-	-	-	4900		4900		11900		14000		-	-	
	Basic static load rating C <sub>0</sub> (N)	Long nut block, types A and B	3450	6300	12150	20200		20200		39200		45500		61900	80900	
		Short nut block, types C and D	-	-	-	10000		10000		19600		22700		-	-	
Radial clearance (mm)	Normal/high accuracy grade	-0.001 to +0.002	+0.002 to -0.003	+0.002 to -0.004	+0.002 to -0.004		+0.002 to -0.004		+0.003 to -0.006		+0.003 to -0.006		+0.004 to -0.007	+0.004 to -0.008		
	Precision grade	-0.005 to -0.002	-0.003 to -0.007	-0.004 to -0.01	-0.004 to -0.012		-0.004 to -0.012		-0.006 to -0.016		-0.006 to -0.016		-0.007 to -0.019	-0.008 to -0.022		
Ball screw	Basic dynamic load rating C <sub>a</sub> (N)	Normal/high accuracy grade	340	230	660	2350	2840	1760	2840	1760	3140	3040	3140	3040	3620	5680
		Precision grade	340	230	660	2350	2250	1370	2250	1370	2940	3430	2940	3430	3980	5950
	Basic static load rating C <sub>0a</sub> (N)	Normal/high accuracy grade	660	410	1170	4020	4900	2840	4900	2840	6760	7150	6760	7150	9290	14500
		Precision grade	660	410	1170	4020	2740	1570	2740	1570	3720	5290	3720	5290	6850	10700
	Screw shaft diameter (mm)		5		6	8	10		10		15		15		20	25
	Lead (mm)		1	2	1	2	6	10	6	10	10	20	10	20	20	25
	Thread minor diameter (mm)		4.5		5.3	6.6	7.8		7.8		12.5		12.5		17.5	22
	Ball center diameter (mm)		5.15		6.15	8.3	10.5		10.5		15.75		15.75		20.75	26
Supporting bearing Axial direction	Basic dynamic load rating C <sub>a</sub> (N)	590		1000	1380	1790		1790		6660		6660		7600	13700	
	Static permissible load P <sub>0a</sub> (N)	290		1240	1760	2590		2590		3240		3240		3990	5830	
Page Numbers to Refer to External Dimension Drawings		P.19, 20		P.21,22	P.23,24	P.25, 26, 27, 28		P.29, 30, 31, 32		P.33, 34, 35, 36		P.37, 38, 39, 40		P.41,42	P.43,44	

Model	Static Permissible Moment		
	M <sub>a</sub>	M <sub>b</sub>	M <sub>c</sub>
KR33-A	166	166	428

Tab. 10: Parametry jednotky KR33 [27]

## T.E.A. TECHNIK NL 106 RC

Osa od T.E.A. byla zamýšlena jako ekonomické řešení s horšími parametry. Po poptání ceny se ovšem ukázala jako nekonkurence schopná, protože je dražší i než některé parametrově lepší osy. Vozík je veden na čtyřech kladkách a v preciznější variantě poháněn kuličkovým šroubem s opakovatelnou přesností polohování  $\pm 0,03$  mm, ta je z poptávaných jednotek nejhorší.



S kuličkovým šroubem							
Obj. číslo*	Rozměry		D1	D2	E	Zatížení A[N]	R[N]
	A	B					
NL106RC_---	88	110	30	17	69	400	400
NL208RC_---	100	110	30	17	71	800	800

Obj. číslo	Max. rychlost	Posuv/otáčka	L max	Přesnost	Max. zatížení šroubu
Ø 16 x 5	250 mm/s	5 mm	2000 mm	+/- 0,03 mm	7000 N
Ø 16 x 10	500 mm/s	10 mm	2000 mm	+/- 0,03 mm	6200 N

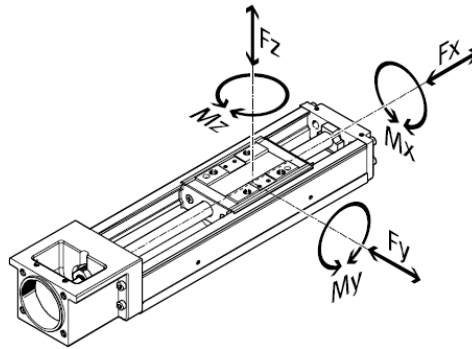
Tab. 11: Parametry osy T.E.A. TECHNIK NL 106 RC [28]

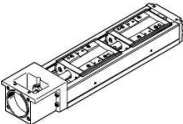


Obr. 30: Osa T.E.A. TECHNIK NL 106 RC [28]

### FESTO EGSK 33

Jednotka využívá k pohonu vozíku, který je uložen na kuličkovém valivém vedení, kuličkového šroubu. FESTO k jednotkám nabízí kompletní příslušenství včetně krokových motorů či servomotorů a jim příslušné montážní sady a řídicí jednotky. Nevýhodou této jednotky je pouze minimální rezerva v přípustném zatěžovacím momentu (dle značení FESTO My), tento parametr jsem ovšem počítal s dostatečnou rezervou.



konstrukce	velikost	pracovní zdvih [mm]	rychlost [m/s]	opakovatelná přesnost [μm]	posuvová síla [N]	vlastnosti vedení				
						síly a momenty				
						Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
elektrické saně EGSK <span style="float: right;">→6</span>										
	15	25 ... 1 00	0,33	±3	57	1 185	1 185	13	3,7	3,7
	20	25 ... 125	1,10	±3	133	2 204	2 204	28,7	9,2	9,2
	26	50 ... 200	0,83	±3	184	3 528	3 528	60	20,4	20,4
	33	100 ... 630	1,10	±3	239	3 920	3 920	79,5	26	26
	46	200 ... 840	1,48	±3	392	7 809	7 809	231	77,3	77,3

Přípustné dynamické síly a momenty <sup>1)</sup>													
velikost				15 <sup>3)</sup>		20		26		33		46	
stoupání vřetena				1	2	1	6	2	6	6	10	10	20
	kód <sup>2)</sup>												
Fy <sub>max.</sub> , Fz <sub>max.</sub>	-/H <sup>4)</sup>	-	[N]	747	593	1 389	764	2 223	1 541	2 469	2 083	4 919	3 904
	p <sup>5)</sup>	-	[N]	1 185	941	2 204	1 213	3 528	2 446	3 920	3 306	7 809	6 198
	-/H <sup>4)</sup>	S	[N]	-	-	-	-	-	-	1 043	880	2 514	1 995
	p <sup>5)</sup>	S	[N]	-	-	-	-	-	-	1 656	1 396	3 990	3 167
Mx <sub>max.</sub>	-/H <sup>4)</sup>	-	[Nm]	8,2	6,5	18,1	9,9	37,8	26,2	50,1	42,2	145	115
	p <sup>5)</sup>	-	[Nm]	13	10,3	28,7	15,8	60	41,6	79,5	67,1	231	183
	-/H <sup>4)</sup>	S	[Nm]	-	-	-	-	-	-	21,2	17,8	74,4	59
	p <sup>5)</sup>	S	[Nm]	-	-	-	-	-	-	33,6	28,3	118	93,7
My <sub>max.</sub> , Mz <sub>max.</sub>	-/H <sup>4)</sup>	-	[Nm]	2,3	1,9	5,8	3,2	12,9	8,9	16,4	13,8	48,7	38,7
	p <sup>5)</sup>	-	[Nm]	3,7	2,9	9,2	5,1	20,4	14,1	26	21,9	77,3	61,4
	-/H <sup>4)</sup>	S	[Nm]	-	-	-	-	-	-	3,8	3,2	13,6	10,8
	p <sup>5)</sup>	S	[Nm]	-	-	-	-	-	-	6	5	21,6	17,1

Tab. 12: Parametry jednotky FESTO EGSK 33 [29]



Obr. 31: Jednotka FESTO EGSK 33 [29]

## Shrnutí parametrů

výrobce	typ vedení	cena bez DPH [Kč]	opakovatelná přesnost	stoupání šroubu	posun na 1 krok (1,8°)
HIWIN	KK05002C-300A1-F0000	13 403,-	±0,01 mm	2 mm/ot	0,01 mm
HENNLICH	SKR3306A - 0295 -0 -0 H AQ	29 860,-	±0,01 mm	6 mm/ot	0,03 mm
HENNLICH	SKR3306A - 0295 H -0 -0 H AQ	30 660,-	±0,005 mm	6 mm/ot	0,03 mm
HENNLICH	SKR3306 - 0295 P -0 -0 H AQ	35 712,-	±0,003 mm	6 mm/ot	0,03 mm
HENNLICH	VLA-ST-60-06-0300-0-ON	18 711,-	±0,02 mm	6 mm/ot	0,03 mm
HENNLICH	KR3306A + 0311,5LH O 00A0	17 976,-	±0,005 mm	6 mm/ot	0,03 mm
T.E.A. TECHNIK	NL 106 RC L-0300	22 792,-	±0,03 mm	5 mm/ot	0,025 mm
FESTO	EGSK-33-300-6P	21 666,-	±0,01 mm	6 mm/ot	0,03 mm

Tab. 13: Přehled možných vedení pro vertikální osu Z

## Zhodnocení

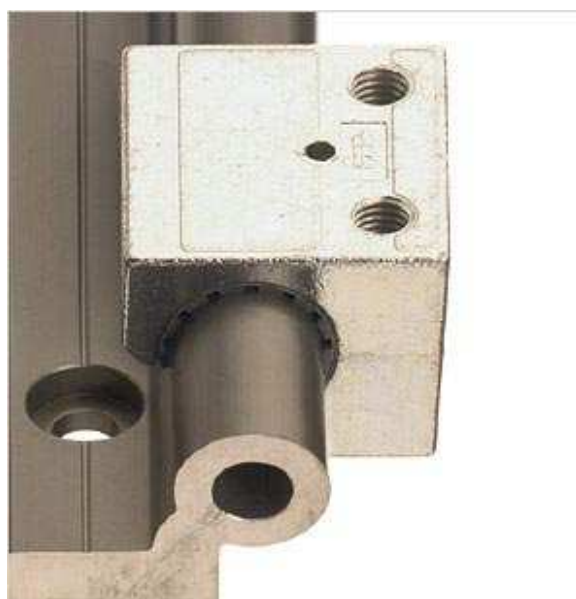
Cenově nejpříjemnější jsou jednotky HIWIN KK50, Hennlich THK VLA ST 60 a Hennlich THK KR33. Pro jednotku HIWIN KK50 byl výrobcem nabídnut pouze krokový motor s jeho montážní sadou a bez řídicí jednotky, takový komplet byl v ceně 17 598,52,- Kč bez DPH. Pro jednotky VLA ST 60 a KR33 je možné objednat pro danou aplikaci výhodnější pohon krokovým motorem se zpětnovazebním řízením, kde nehrozí vypadnutí motoru z kroku při přetížení. Vzhledem k tomu, že jednotka VLA ST 60 byla nakonec nabídnuta za vyšší cenu než jednotka KR 33, jenž vykazuje lepší parametry zejména v oblasti maximálního zrychlení, jsem jednotku VLA ST 60 z výběru vyřadil. Zbyly tak dvě varianty a to levnější jednotka KK50 s krokovým motorem PK245 bez zpětné vazby. Druhou variantou je dražší KR33 s krokovým motorem s driverem se zpětnou vazbou, tato na sebe vyladěná sada byla nabídnuta firmou Hennlich s.r.o..



## 8.2 Horizontální vedení nádrže

Toto vedení je zde pro zajištění vodorovného přímočarého pohybu nádrže. Tento pohyb je zde kvůli použití metody oddělení vytvrzené vrstvy od dna nádrže sesmýknutím přes hranu. Hmotnost nádrže s fotopolymerem a jejím rámem bude 10kg. Realizace je možná několika způsoby.

Použitím dvou jednoduchých kolejnic se čtyřmi vozíky s kluznými pouzdry a pohon pomocí krokového motoru přes ozubený řemen. V této variantě je konkrétně poptáváno kluzné vedení WS 10 systému DryLin W od společnosti HENNLICH s.r.o. zobrazené na obr. 32. Pro pohon je pak uvažován krokový motor kategorie NEMA 24, který dosahuje kroutícího momentu 2,8 N.m, díky němuž je možné pohánět přímo ozubený řemen HTD 3M šíře 15 mm. Z důvodu použití kluzných vedení je zde riziko křížení a zakusování vozíků, pokud by nebyla tažná síla v ose mezi kolejnicemi. Umístění řemene do osy mezi kolejnice tak, aby byla rovina řemene orientována svisle, brání skutečnost, že zpětná větev řemene nemůže být v ose mezi kolejnicemi vedena, zde by bránila v promítání vrstev. Problém eliminuje konstrukčně složitější varianta vedení řemene v horizontální rovině, ta jednak vyžaduje větší délku řemene a pak větší počet kladek. Konkrétně to jsou čtyři kladky vodící, jedna hnací řemenice na motoru a dvě kladky napínací, ty zajišťují dostatečné opášení hnací řemenice. Pro porovnání u svisle orientovaného řemene by to byla jen hnací řemenice a jedna vodící kladka na protilehlé straně rámu.



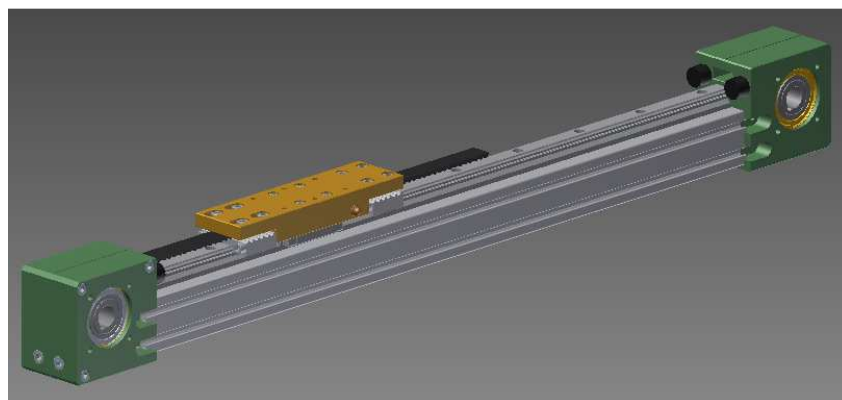
Obr. 32: Kolejnice s vozíkem systému Igus® DryLin® W [30]

Problém křížení a zakusování vozíků lze také řešit nahrazením kluzných pouzder vozíky s oběhem kuliček. Pro tuto variantu je poptáváno lineární valivé vedení HSR 15 v ekonomické třídě přesnosti Ct. Vedení vyrábí společnost THK CO., LTD. a je zobrazeno na obr. 33. Vedení bez problému zvládá asymetrické zatížení a navíc vyniká výrazně nižšími pasivními odpory. Díky těmto výhodám valivého vedení je možné bez problému použít jednodušší variantu vedení hnacího ozubeného řemene se svislou rovinou řemene a posunutou ke straně k jedné kolejnici tak, aby zpětná větev řemene nestínila projektoru při promítání vrstev.



*Obr. 33 Valivé lineární vedení HSR [31]*

U obou předchozích variant je nutné mnoho komponent vyrábět nebo upravovat. Jde zejména o komponenty zajišťující vedení a uchycení řemene a dále o uložení motoru. Zajišťování výroby těchto komponent odpadne, pokud se jedna kolejnice vedení HSR nahradí integrovanou osou s vlastním pohonem. Společnost HENNLICH s.r.o. takovou osu nabídla. Jde o nově vyvinutou jednotku LJHR40G viz. Obr. 34. K jednotce byl nabídnut i příslušný krokový motor navrhnutý na požadované parametry s převodovkou a driverem krokového motoru.



*Obr. 34: Osa HENNLICH LJHR40G [32]*

### 8.3 Vedení projektoru

Vedení je zde pro snadnější a rychlejší nastavení vzdálenosti projektoru od projekční roviny. Usnadňuje i přenastavení tiskárny při změně velikosti pracovního prostoru. Vedení by mělo zajistit dostatečně jemné ruční nastavení vzdálenosti projektoru od projekční roviny a následné zaaretování. Dále by mělo poskytovat dostatečnou tuhost, aby nedoházelo k vibracím projektoru buzených pohybem jiných částí zařízení. Vzhledem k rozdílu v projekční vzdálenosti mezi promítáním do maximálního rozměru pracovního prostoru, ten činí 320 x 184 mm při naměřené projekční vzdálenosti 365 mm a promítáním do minimálního zaostřitelného pracovního prostoru, zde byla naměřena hodnota 80 x 46 mm při projekční vzdálenosti 84 mm, která je 281 mm. Je vhodné, aby vedení mělo zdvih minimálně 300 mm, optimálně 350 mm.

Takové požadavky splní nejlépe jednotka s posuvným stolem vedeným pomocí kluzných pouzder po tyčích a posouváním ručně ovládaným trapézovým šroubem s aretací. Zde byly poptávány 3 typy takovýchto jednotek. Všechny dodává společnost HENNLICH s.r.o., konkrétně jde o typy SHT-12-SWM, dále jednotka SHT-12-AWM a nakonec jednotka SLW. Podrobněji viz. Tab. . Všechny jednotky využívají k vedení systém DryLin W se dvěma kolejkami upevněnými v koncových hliníkových blocích a bezúdržbový šroub s maticí z materiálu iglidur®.

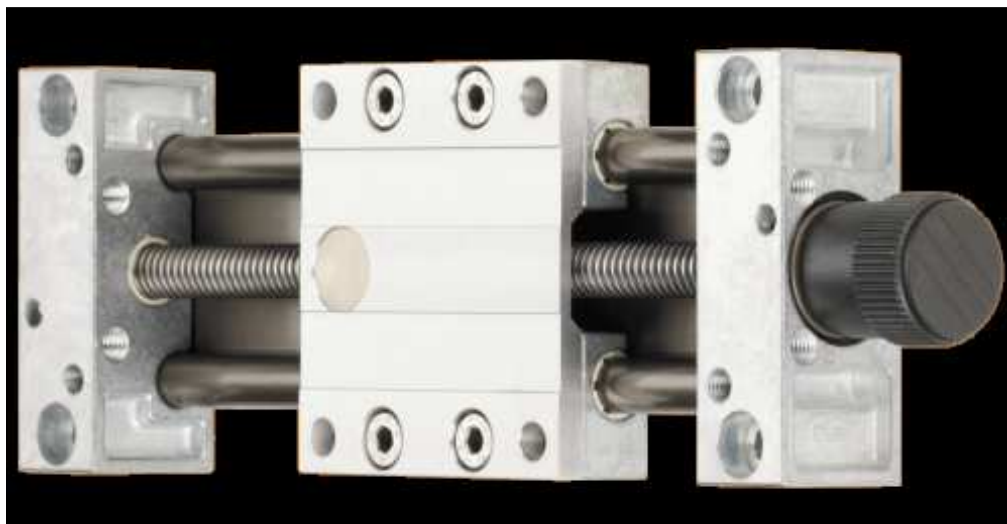
jednotka	zdvih [mm]	ovládání ručním kolečkem s aretací	materiál vodičích tyčí	cena bez DPH [Kč]
Lineární posuvný stůl SHT SHT-12-SWM-HK-HR	350	ano	broušená kalená ocel	9300,-
Lineární posuvný stůl SHT SHT-12-AWM-HK-HR	350	ano	tvrdě eloxovaný hliník	9500,-
Lineární posuvný stůl SLW SLW-1040-HR-HK	350	ano	tvrdě eloxovaný hliník	8800,-

Tab. 14: Přehled možných vedení projektoru

Vzhledem k tomu, že všechna vedení splňují všechny požadavky, je rozhodujícím faktorem pro volbu cena vedení. Z tohoto důvodu volím lineární posuvný stůl SLW SLW-1040-HR-HK , zdvih=350mm. Lineární posuvné stoly SHT proti stolům SLW



vynikají pouze esteticky opracovaným a eloxovaným povrchem hliníkových bloků, ten pro tuto aplikaci nemá většího významu.



*Obr. 35: Lineární posuvný stůl SLW s ovládním ručním kolečkem [33]*



*Obr. 36: Modul aretace pro lineární posuvný stůl SLW [33]*

## 8.4 Řízení os

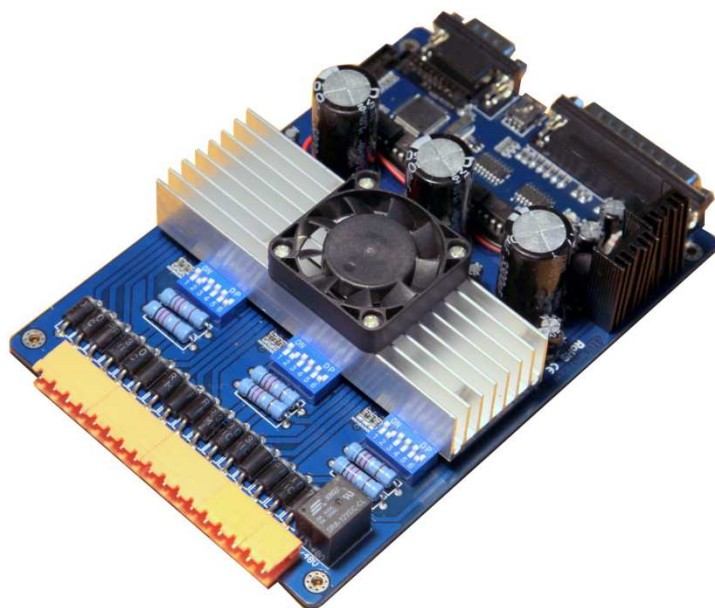
Na tiskárně jsou použity dvě řízené osy. Obě osy využívají ke svému pohonu krokových motorů.

**Krokový motor (KM)** je impulsně napájený motor, jehož funkční pohyb je nespojitý a děje se po jednotlivých úsecích (krocích). K řízení krokového motoru slouží ovladač krokového motoru. [33]

**Ovladač krokového motoru** řídí funkční pohyb a režimy chodu krokového motoru. Řídí jej tak, že budí fáze vinutí krokového motoru v jisté časové posloupnosti. Ovladač musí splnit dva požadavky. Jednak musí zajistit výkonové buzení fází motoru a dále vytvořit předepsanou časovou posloupnost buzení fází motoru. Ovladač se skládá z výkonové části a komutátoru. Výkonová část je obvykle tvořena výkonovými spínacími prvky, jejichž počet odpovídá počtu fází KM. Komutátor je elektronické zařízení, které na základě vstupních informací řídí spínání výkonových spínacích prvků tak, aby každému řídicímu impulsu odpovídalo natočení KM o jeden krok. [33]

V praxi se používá dvou koncepcí ovladačů a to tzv. driverových desek, které v sobě kombinují jak elektronickou komutaci, tak i výkonovou část, nebo pak oddělené desky a samostatných driverů - výkonných spínacích prvků. Driverové desky obvykle mají výstupy pro více motorů, kdežto samostatný driver je vždy jeden pro každý motor. Samostatný driver má výhodu v tom, že může být umístěn blízko motoru a to umožňuje zkrátit vedení mezi driverem a motorem, jehož délka nepříznivě ovlivňuje dynamiku pohonu. Nevýhodou samostatného driveru je vyšší cena takového řešení oproti driverové desce.

Z toho porovnání vychází, že v případě cenově orientované varianty s jednotkou HIWIN a krokovými motory z řady NEMA bez zpětné vazby by bylo vhodné zvolit ekonomicky výhodnější driverovou desku. Naopak osu KR33 je vhodné kombinovat s krokovým motorem se samostatným driverem se zpětnou vazbou, kde takový celek je možné objednat u společnosti HENNLICH s.r.o..



Obr. 37: Driverová deska pro řízení 3 krokových motorů [35]



Obr. 38: Příklad samostatného driveru [35]

Propojení s PC se provádí přes rozhraní LPT. Dnes toto rozhraní na nových počítačích stěží nalezneme, lze ho však snadno doplnit pomocí PCI-LPT adaptéru. Dále je nutné zajistit napájení driverů, na to se hodí průmyslový stejnosměrný napájecí zdroj 24V 350W.

## 8.5 Cenová rozvaha variant vedení

Na základě analýzy dostupných jednotek, porovnání jejich parametrů a ceny jsem vybral optimální komponenty a z nich sestavil následující 3 varianty celkového systému pohonů a os projektované 3D DLP tiskárny.

### Varianta A (ekonomická)

#### Vertikální osa:

-lineární jednotka HIWIN KK50 s krokovým motorem 21729,- Kč s DPH

#### Horizontální osa:

-2x kolejnice a 4x vozík DryLin W 10 4421,- Kč s DPH

-řemen HTD 3M široký 15 mm cca 700,- Kč s DPH

-6x sestava vodící kladky, řemenice na motor cca 1000,- Kč s DPH

-krokový motor NEMA 24 1561,- Kč s DPH

#### Řízení motorů:

-řídící jednotka pro 3 motory s možností ručního ovládní os (driverová deska) 4344,- Kč s DPH

-napájecí zdroj 24V 350W 957,- Kč s DPH

-LTP adaptér 196,- Kč s DPH

#### Vedení projektoru:

-lineární posuvný stůl SLW SLW-1040-HR-HK 10648,- Kč s DPH

**odhad ceny varianty A 45556,- Kč s DPH**

**Varinta B** (plně splňuje požadavky s minimálními nároky na výrobu vlastních komponent)

Vertikální osa:

-Lineární jednotka KR3306A + 0311,5LH O 00A0	21751,- Kč s DPH
-krokový motor s brzdou a řídicí jednotkou se zpětnou vazbou (pulzní řízení) –	19255,- Kč s DPH

Horizontální osa:

-krokový motor s řídicí jednotkou bez zpětné vazby (pulzní řízení) -	9583,- Kč s DPH
-převodovka s převodem $i=3$	7768,- Kč s DPH
-lineární jednotka LJHR40G se zdvihem 400mm	17387,- Kč s DPH
-2x vozík HSR HSR 15CSSCt	1418,- Kč s DPH
-kolejnice HSR	2250,- Kč s DPH

Řízení:

-napájecí zdroj 24V 350W	957,- Kč s DPH
-řídicí deska	2870,- Kč s DPH
-LTP adaptér	196,- Kč s DPH

Vedení projektoru:

-lineární posuvný stůl SLW SLW-1040-HR-HK	10648,- Kč s DPH
---	------------------

**odhad ceny varianty B** **94083,- Kč s DPH**

### **Varianta C** (kompromisní varianta mezi variantami A a B)

#### Vertikální osa:

-Lineární jednotka KR3306A + 0311,5LH O 00A0	21751,- Kč s DPH
-krokový motor s brzdou a řídicí jednotkou se zpětnou vazbou (pulzní řízení) –	19255,- Kč s DPH

#### Horizontální osa:

-2x kolejnice a 4x vozík DryLin W 10	4421,- Kč s DPH
-řemen HTD 3M široký 15 mm	cca 700,- Kč s DPH
-6x sestava vodící kladky, řemenice na motor	cca 1000,- Kč s DPH
-krokový motor NEMA 24	1561,- Kč s DPH
-samostatný driver motoru	978,- Kč s DPH

#### Řízení:

-napájecí zdroj 24V 350W	957,- Kč s DPH
-řídicí deska	2870,- Kč s DPH
-LTP adaptér	196,- Kč s DPH

#### Vedení projektoru:

-lineární posuvný stůl SLW SLW-1040-HR-HK	10648,- Kč s DPH
---	------------------

**odhad ceny varianty C** **64337,- Kč s DPH**

### **Výběr varianty**

Po konzultaci s vedoucím práce jsem zvolil variantu B, protože vyniká nejlepšími parametry, má nejmenší požadavky na výrobu či úpravy komponent (další vícenáklady) a vzhledem k tomu, že většina komponent je dodávána firmou Hennlich, tak je zaručena i vzájemná kompatibilita.

## 9 Rám tiskárny

Rám tiskárny jsem se rozhodl sestavit z hliníkových profilů. Profily byly poptávány u společnosti MOAS CS s.r.o. a u společnosti ALUTEC K&K a.s.. Nakonec bylo rozhodnuto objednat profily u společnosti ALUTEC K&K a.s., konkrétně se jednalo o profily viz. tab. 15 a příslušenství viz tab. 16 a tab. 17. Koncepce rámu je patrná ze skici viz. obr. 39.

typ profilu	délka [mm]	ks	zakončení A	zakončení B
104040	1450	4	středový závit M8 pro stavěcí patku	-
104040	1100	9	úprava pro rychlospojku 311500ESD	úprava pro rychlospojku 311500ESD
104040	1100	1	závit M8 v ose	závit M8 v ose
104040	400	6	úprava pro rychlospojku 311500ESD	úprava pro rychlospojku 311500ESD
104040	770	2	-	-
104040	220	2	úprava pro rychlospojku 311500ESD	úprava pro rychlospojku 311500ESD

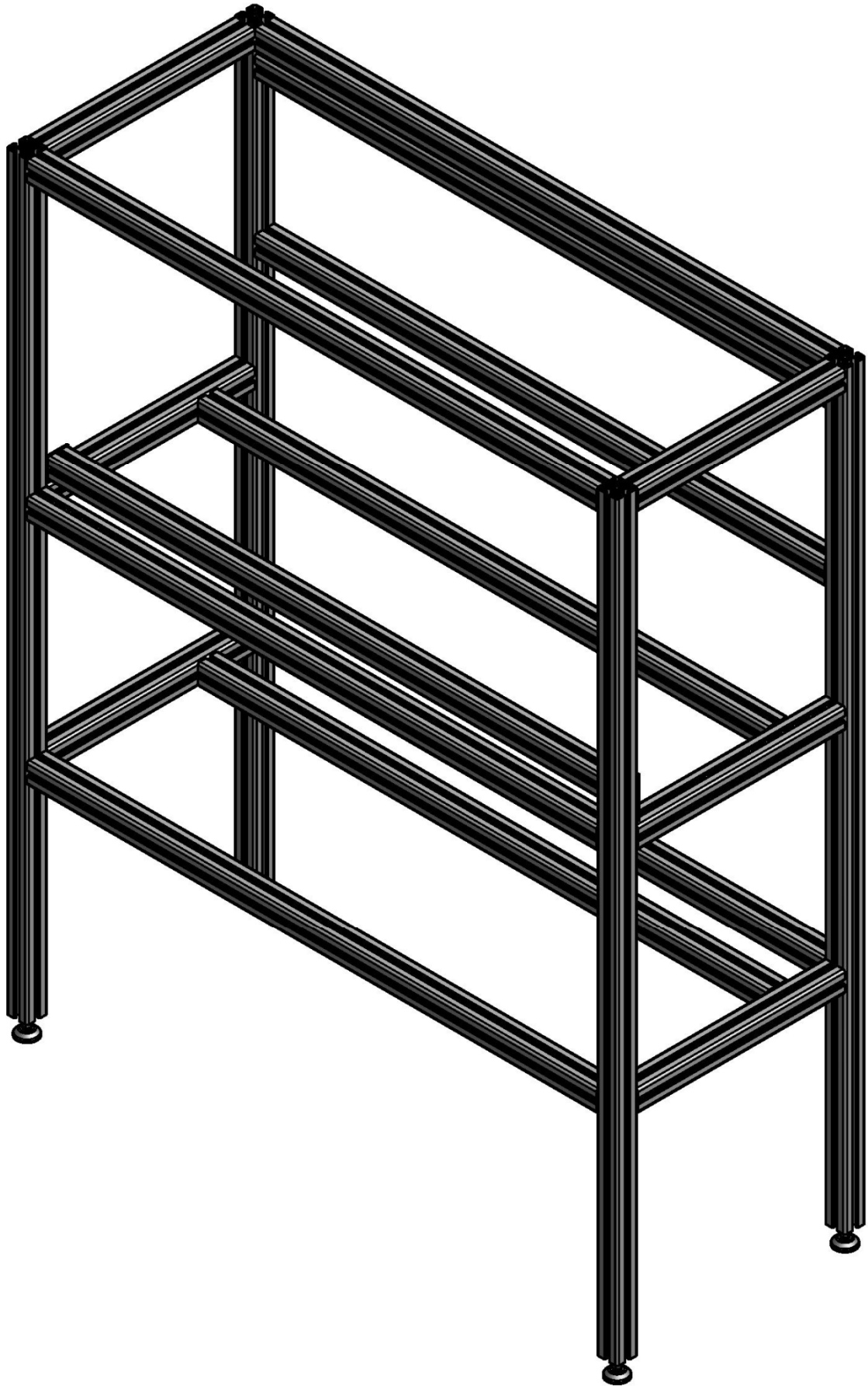
Tab. 15: Profily Alutec

typ	ks
rychlospojka 311500ESD	34

Tab. 16: Kotvy profilů pro montáž rámu

typ	ks
stavěcí patky 404008	4
záslepka 224040	8
šroub M8x20 200820	2
matice s pružinkou M5 210452	4
matice s pružinkou M4 210442	19
matice s pružinkou M6 210462	16
šroub M6x12 200612.3	12
šroub M5x16 200516.3	7
šroub M5x10 200510.3	4

Tab. 17: Ostatní materiál pro montáž rámu a přichycení jednotek k rámu



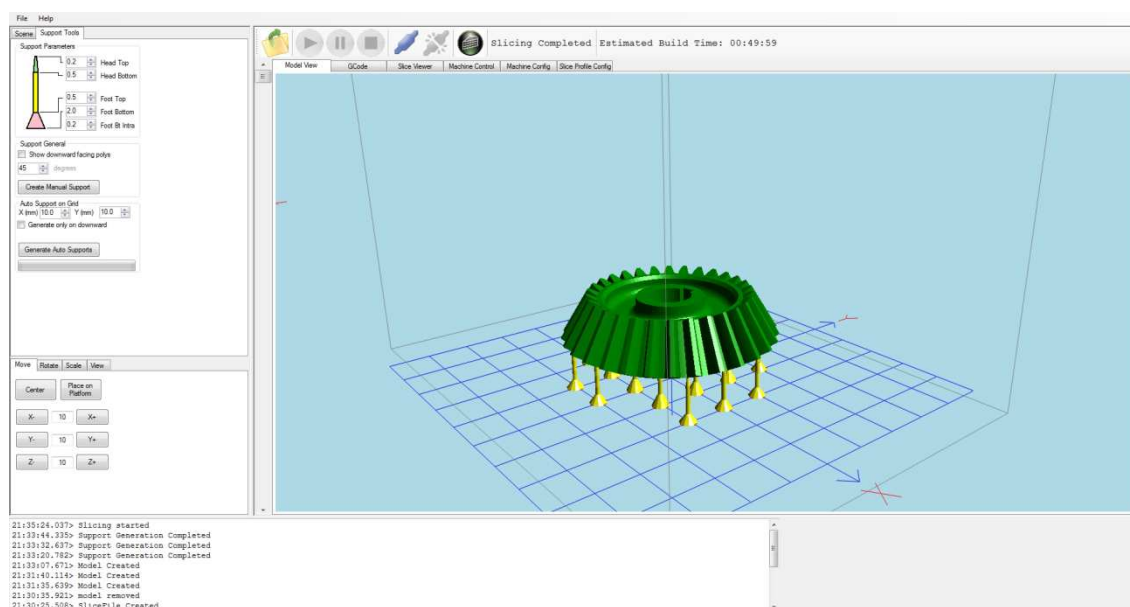
*Obr. 39: Skica rámu tiskárny*



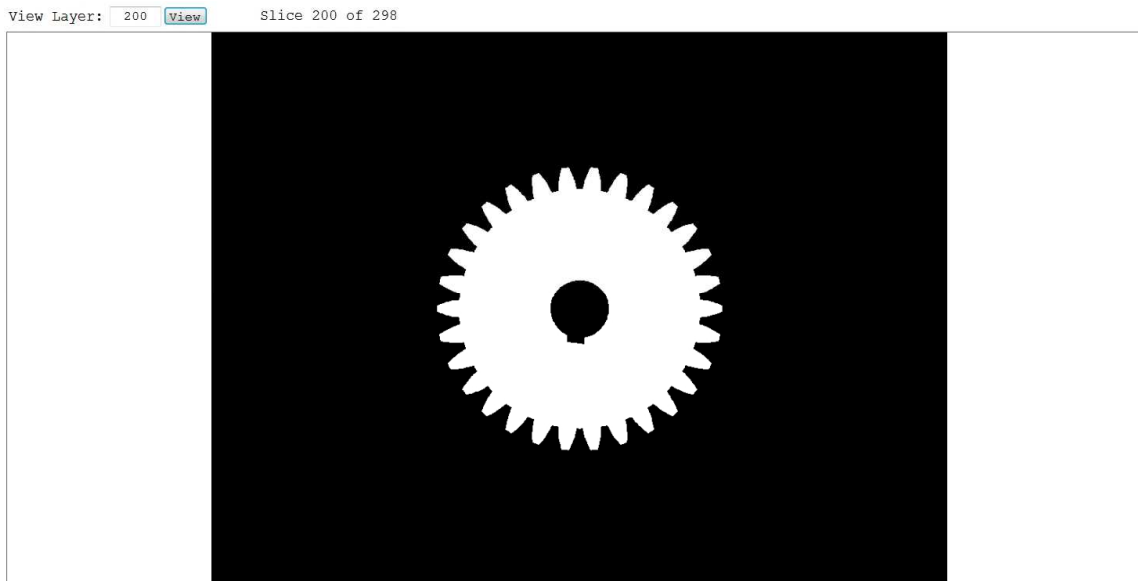
## 10 Software

Aby bylo možné tiskárnu uvést do provozu je zapotřebí softwaru, který by byl schopen model exportovaný z libovolného CAD programu do formátu .stl naorientovat do pracovního prostoru tiskárny. Poté musí být schopen v případě potřeby vygenerovat podpůrné konstrukce a vytvořit z této geometrie řezy, které se budou následně promítat. Při promítání musí být software schopen promítat jednotlivé řezy, bylo by vhodné, aby uměl řídit i parametry promítání. Zároveň s promítáním musí řídit i pohyblivé osy stroje, zejména osu Z.

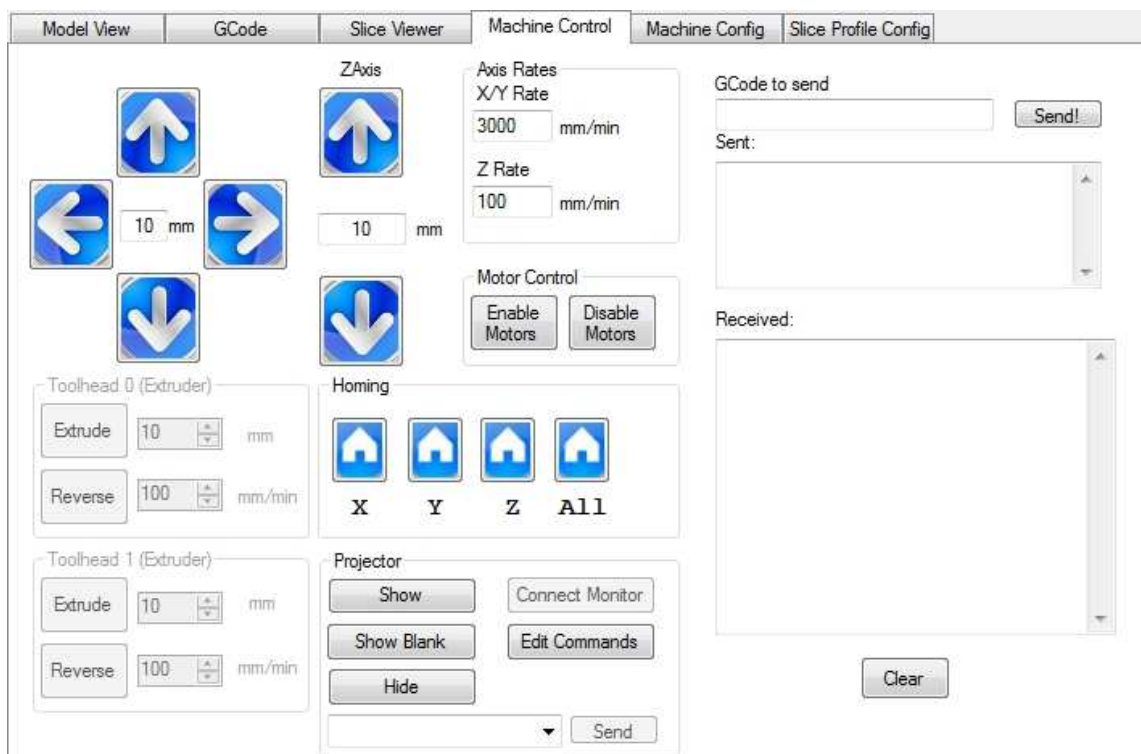
Takovým softwarem, který splňuje výše uvedené požadavky, je program Creation Workshop. Program vyvíjí Steve Hernandez a Shai Segar pod hlavičkou ENVISION LABS a je určen pro řízení SLA a DLP tiskáren. Program je nabízen zdarma pro nekomerční využití. Schopnosti tohoto softwaru jsou patrné z přiložených screenshotů pracovního prostředí. Pro názornost a otestování jsem použil a do pracovního prostoru tiskárny naorientoval model kuželového kola s přímými zuby. Pro názornost a otestování jsem použil a do pracovního prostoru tiskárny naorientoval model kuželového kola s přímými zuby.



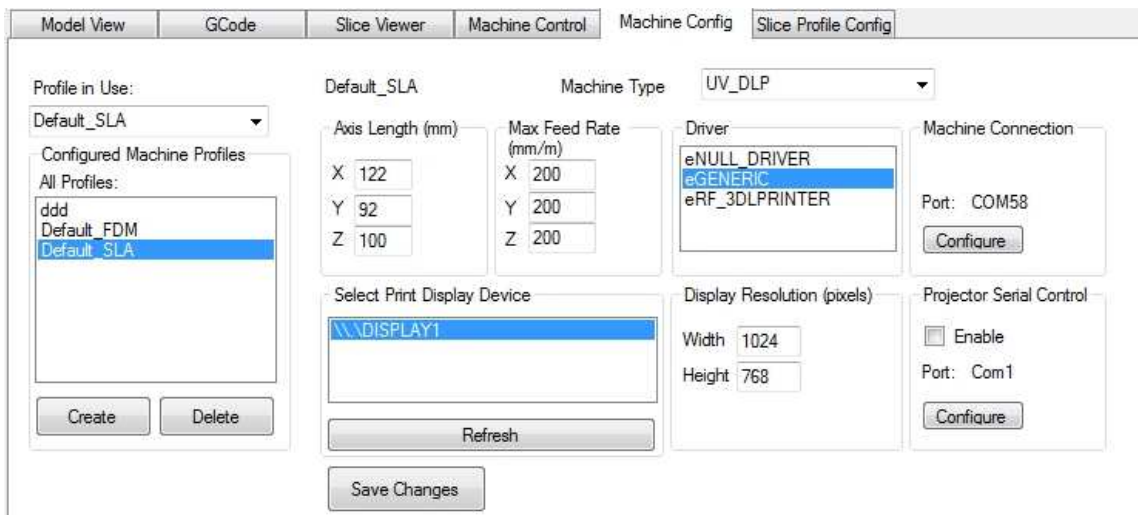
*Obr. 40: Pracovní prostředí softwaru s naorientovaným modelem a vygenerovanými podpůrnými*



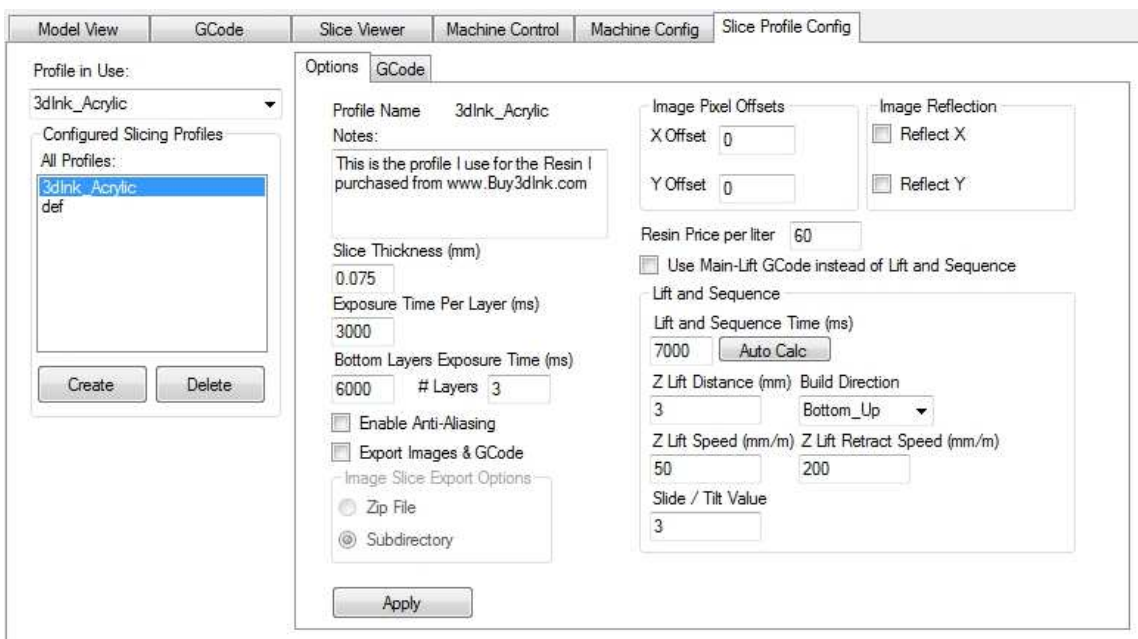
*Obr. 41: Jeden z vygenerovaných řezů - tyto řezy budou projektorem promítány*



*Obr. 42: Rozhraní softwaru pro ruční řízení os tiskárny*



Obr. 43: Možnosti nastavení stroje a pracovního prostoru



Obr. 44: Nastavení řezání vrstev a charakteristik pohybů os při přechodu na další vrstvu

Tento software je z mého pohledu vhodný minimálně pro ověření koncepce a funkčnosti hardwaru tiskárny. Pro případné komerční využití tiskárny je zapotřebí kontaktovat vývojáře softwaru pro zajištění licence, případně se vydat cestou zajištění vývoj vlastního softwaru.

## 11 Celková cenová kalkulace

Pro konstrukci 3D DLP tiskárny byly nakupovány tyto díly:

Projektor Acer H6510BD	17 990,- Kč s DPH
Cena os, pohonů a elektroniky dle varianty B (viz. strana 61)	94 083,- Kč s DPH
Rám z profilů AluTec včetně konektorů a matic do drážek	21 424,- Kč s DPH
Plexisklo UVT Solar na stavbu nádrže	1 013,- Kč s DPH
Lepidlo Acrifix 192	185,- Kč s DPH
PDMS Sylgard 184	1 602,30,- Kč s DPH

**Celková cena nakupovaných komponent** **136 297,30,- Kč s DPH**

Dále byla řada dílů vyráběna svépomocí v laboratořích a dílnách Katedry výrobních systémů Technické univerzity v Liberci. Tyto díly nejsou v kalkulaci zahrnuty.

## 12 Realizace návrhu 3D tiskárny

V době odevzdání práce je realizace 3D DLP tiskárny ve stavu patrném z následujících fotek. Je sestaven rám tiskárny, slepena nádrž a usazena v jejím rámu, díly určené k výrobě jsou hotovy a jsou z nich sestaveny podsestavy. Čeká se na dodání jednotek pro osu Z a vodorovnou osu, jejich motorů a příslušných driverů.



*Obr. 45: Rám tiskárny s připevněným vedením SLW připraveným pro montáž projektoru*



*Obr. 46: Slepená nádrž usazená v jejím rámu*

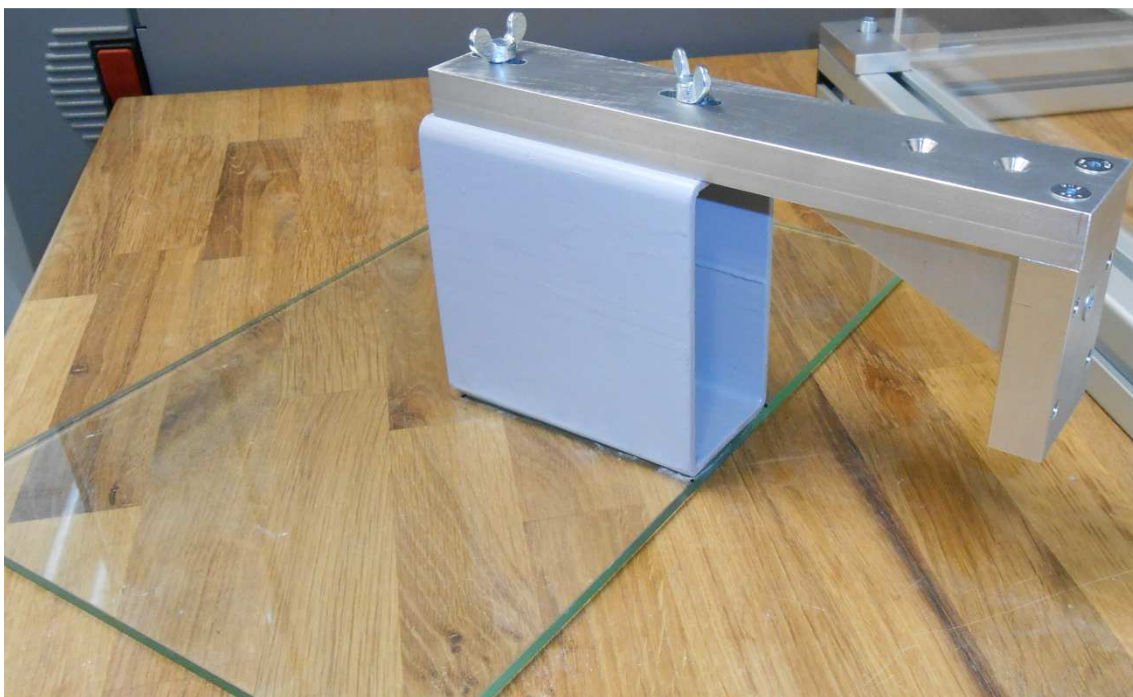




*Obr. 47: Držák základní desky*



*Obr. 48: Základní deska (sklo) s nalepeným adaptérem pro držák*



Obr. 49: Kompletní sestava základní desky připravená pro montáž k ose Z



Obr. 50: Vlevo přípravek Sylgard 184, vpravo dole řídicí deska s ručním ovládáním, nahore průmyslový stejnosměrný zdroj 24V 350W

## 13 Závěr

Práce obsahuje přehled metod Rapid prototypingu využívajících ke stavbě objektů fotopolymerů. Seznamuje se současnými 3D tiskárnami podobné technologie a se stavebním materiálem, kterým jsou fotopolymery a také s několika již komerčně vyráběnými typy fotopolymerů. Práce obsahuje teorii o 3D DLP tisku, návrh koncepce 3D DLP tiskárny a přehled vhodných komponent pro toto zařízení. Dále obsahuje výběr komponent a návrh 3D tiskárny, možnosti řízení pohonů tiskárny a možnosti softwaru. V závěru práce je patrný i počátek realizace navrhované 3D DLP tiskárny.

Vzhledem k tomu, že tiskárna ještě není dostavěna a poté půjde teprve do fáze testování, byl zde požadavek zatím stroj nekrytovat. V budoucnu by ovšem bylo vhodné provést krytování pracovního prostoru tiskárny alespoň kouřovým UV nepropustným plexisklem, aby se zamezilo degradaci stavebního materiálu vlivem ozařování vnějším světlem. Rovněž je zapotřebí dořešit upevnění elektroniky k rámu. Elektroniku jsem v době dokončení této zprávy ještě neměl kompletně k dispozici a nebyly mi známy ani její montážní rozměry. Dále bych doporučil zakrytovat i spodní prostor tiskárny, aby se zamezilo vnikání nečistot s tím, že musí být umožněno chlazení komponent elektroniky a projektoru. K tomuto účelu by bylo vhodné použít ventilátorů s prachovými filtry.

Pro zlepšení možností tiskárny v budoucnu se mi jeví jako vhodná výměna současného projektoru s rozlišením Full HD za projektor s rozlišením 4k. To by umožnilo využít pracovní prostor tiskárny s lepším XY rozlišením. Jediný takový projektor, který byl v době tvorby této práce dostupný, byl Sony VPL-VW500ES, ten však s cenou okolo 300 000,- Kč byl s daným cenovým rozpočtem pro použití v této 3D DLP tiskárně nepřijatelný.

Tiskárna bude umístěna v laboratoři 3D tisku Katedry výrobních systémů Technické univerzity v Liberci a zde rozšíří její strojový park. V současné době je v laboratoři pro tisk z fotopolymerů pouze komerční 3D tiskárna Objet500 Connex pracující s technologií Jetted photopolymer, ta je schopná tisknout pouze z materiálů od výrobce, kterým je Stratasys Ltd. Navrhovaná 3D DLP tiskárna přinese možnost tisknout ze širší škály materiálů a provádět na zařízení experimenty. Dalším přínosem je možnost dle potřeby 3D tiskárnu snadno modifikovat, nebo testovat nové technologie či postupy. Modifikace komerčního 3D tiskárny zde nepřichází v úvahu zejména kvůli ztrátě záruky.



## Soupis bibliografických citací

- [1] GIBSON, I. - ROSEN, D. W. - STUCKER, B.: Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer, 2010, ISBN 978-1-4419-1119-3
- [2] KATEDRA VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ: *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping*. Liberec 2012, [online]. [cit. 1. listopadu 2013]. Dostupné na: [http://www.kvs.tul.cz/download/rapid\\_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf](http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf)
- [3] CUSTOMPARTNET [online]. [cit. 10. března 2014]. Dostupné na: <http://www.custompartnet.com/>
- [4] *Solid Ground Curling* [online]. [cit. 2. února 2014]. Dostupné na: <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de/html/sgc/eindex.html>
- [5] *3DPrint DLP* [online]. [cit. 1. dubna 2014]. Dostupné na: <http://3dprinterdlp.com/definition-and-technology/>
- [6] *3ders* [online]. [cit. 8. května 2014]. Dostupné na: <http://www.3ders.org/articles/20130625-ez-3d-printer-introducing-new-dlp-based-diy-kit.html>
- [7] *Optical sciences Corporation* [online]. [cit. 25. března 2014]. Dostupné na: <http://www.opticalsciences.com/dmd.html>
- [8] *AUDIOHOLICS* (Online A/V Magazine) [online]. [cit. 25. března 2014]. Dostupné na: <http://www.audioholics.com/hdtv-formats/display-technologies-guide-lcd-plasma-dlp-lcos-d-ila-crt/display-technologies-guide-lcd-plasma-dlp-lcos-d-ila-crt-page-2>
- [9] *DLP projector* [online]. [cit. 24. října 2013]. Dostupné na: [http://www2.units.it/ipl/students\\_area/imm2/files/DLP\\_RGBW/dlp\\_projector.ppt](http://www2.units.it/ipl/students_area/imm2/files/DLP_RGBW/dlp_projector.ppt)
- [10] *3D Printer World* [online]. [cit. 10. dubna 2014]. Dostupné na: <http://www.3dprinterworld.com/article/pegasus-touch-laser-3d-printer>
- [11] *Full Spectrum LASER* [online]. [cit. 10. dubna 2014]. Dostupné na: <http://fslaser.com/pegasus-touch-laser-3d-printer-by-fsl3d>
- [12] *3D natives* [online]. [cit. 10. dubna 2014]. Dostupné na: <http://www.3dnatives.com/3D-compare/imprimante/b9creator>

- [13] *3ders Ilios HD* [online]. [cit. 10. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.3ders.org/articles/20130426-ilios-hd-sla-3d-printer.html>
- [14] *tct MAG* [online]. [cit. 10. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/3d-systems-commences-shipping-of-projet-1200-micro-sla-3d-pr/>
- [15] *FormLabs* [online]. [cit. 11. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://formlabs.com/products/form-1/>
- [16] *MiiCraft* [online]. [cit. 11. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.miicraft.com/news/1st-miicraft-unit-complete/>
- [17] *Envisintec* [online]. [cit. 19. května 2014]. Dostupné na:  
<http://envisintec.com/materials/>
- [18] *FormLabs* [online]. [cit. 1. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://formlabs.com/products/materials/>
- [19] *Sedgwick 3D* [online]. [cit. 1. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://sedgwick3d.com/p/4/11-uv-cured-acrylic-based-resin>
- [20] *Spot-A Materials* [online]. [cit. 9. března 2014]. Dostupné na:  
<http://spotamaterials.com/>
- [21] *Xunhetrade* [online]. [cit. 12. prosince 2013]. Dostupné na:  
[http://www.xunhetrade.com/products\\_info/Acer-H6510BD-Projector-16751.html](http://www.xunhetrade.com/products_info/Acer-H6510BD-Projector-16751.html)
- [22] *PLEXIGLAS* [online]. [cit. 13. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.plexiglas.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/PLEXIGLAS-Sheet/PLEXIGLAS/232-6-PLEXIGLAS-XT-UV-transmitting-en.pdf>
- [23] *TITAN multiplast* [online]. [cit. 15. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.titan-multiplast.cz/produkty/pruhledne-plne-desky-76/plexisklo-uvt-solar-132/>
- [24] *HIWIN* [online]. [cit. 16. května 2014]. Dostupné na:  
[http://www.hiwin.cz/en/products/positioning-systems/linear-axis-kk/125\\_kk-50](http://www.hiwin.cz/en/products/positioning-systems/linear-axis-kk/125_kk-50)
- [25] *THK SKR* (katalog) [online]. [cit. 16. května 2014]. Dostupné na:  
[https://tech.thk.com/upload/catalog\\_claim/pdf/309-8E\\_SKR.pdf](https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/309-8E_SKR.pdf)
- [26] *THK VLA* (katalog) [online]. [cit. 16. května 2014]. Dostupné na:  
[https://tech.thk.com/upload/catalog\\_claim/pdf/320E\\_VLA.pdf](https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/320E_VLA.pdf)

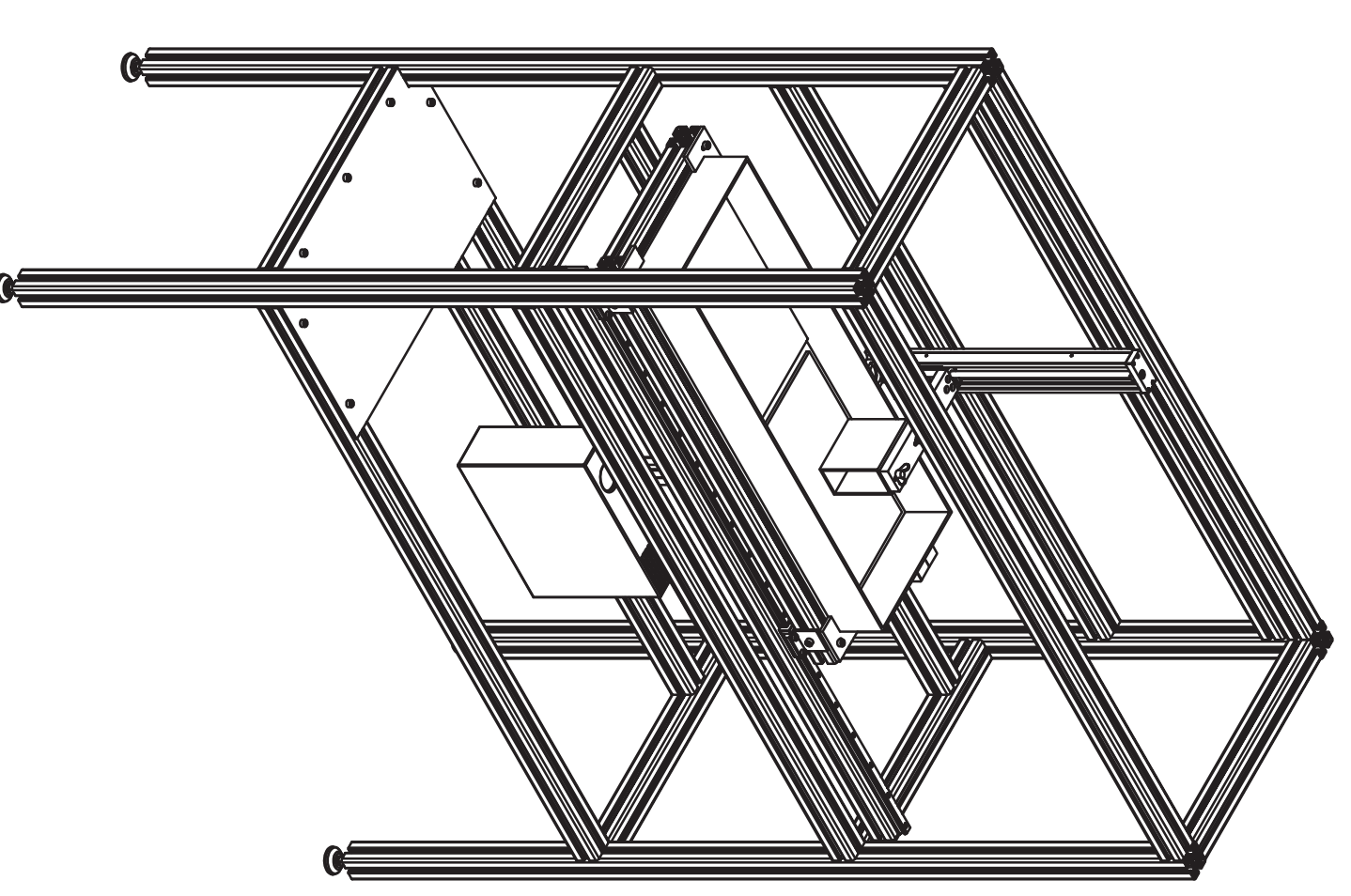
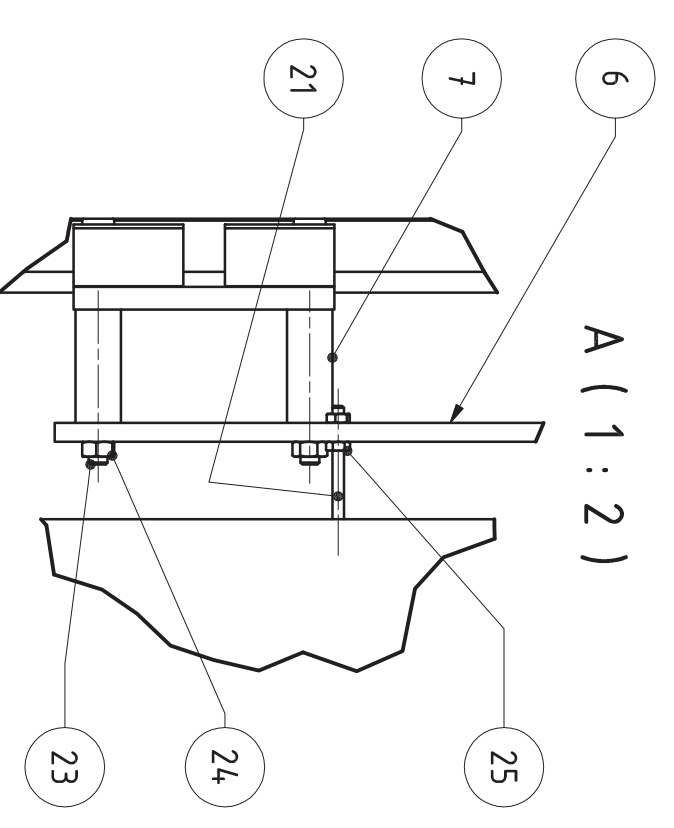
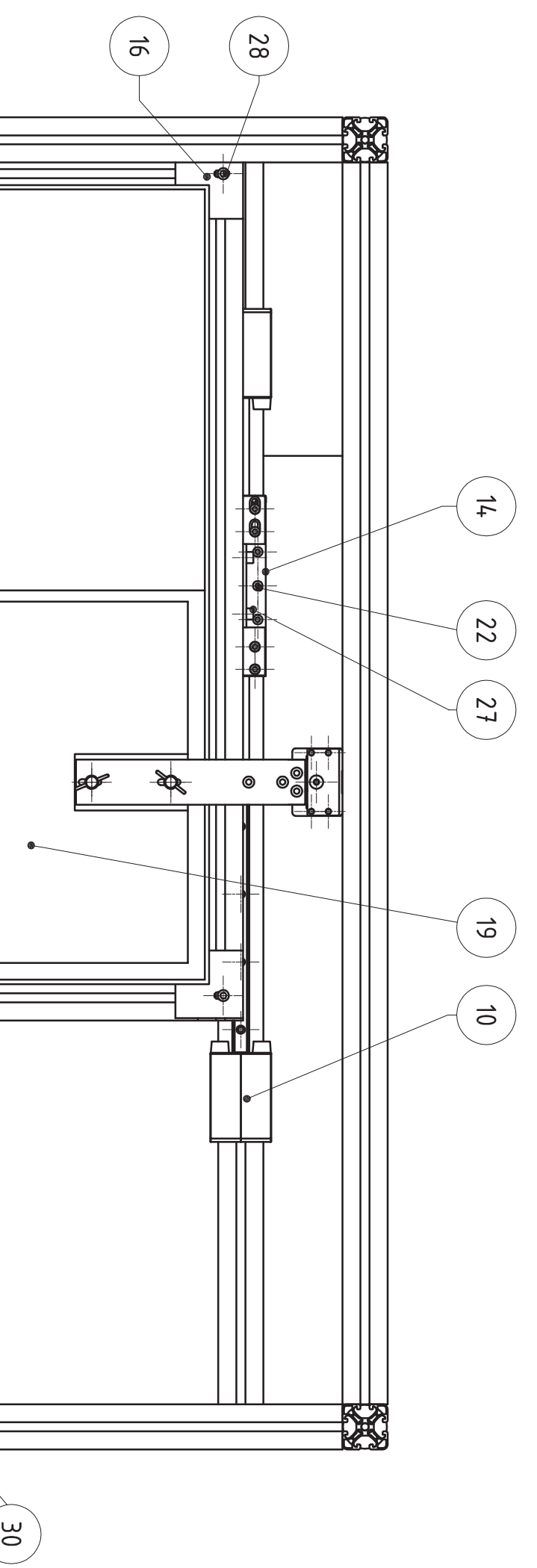
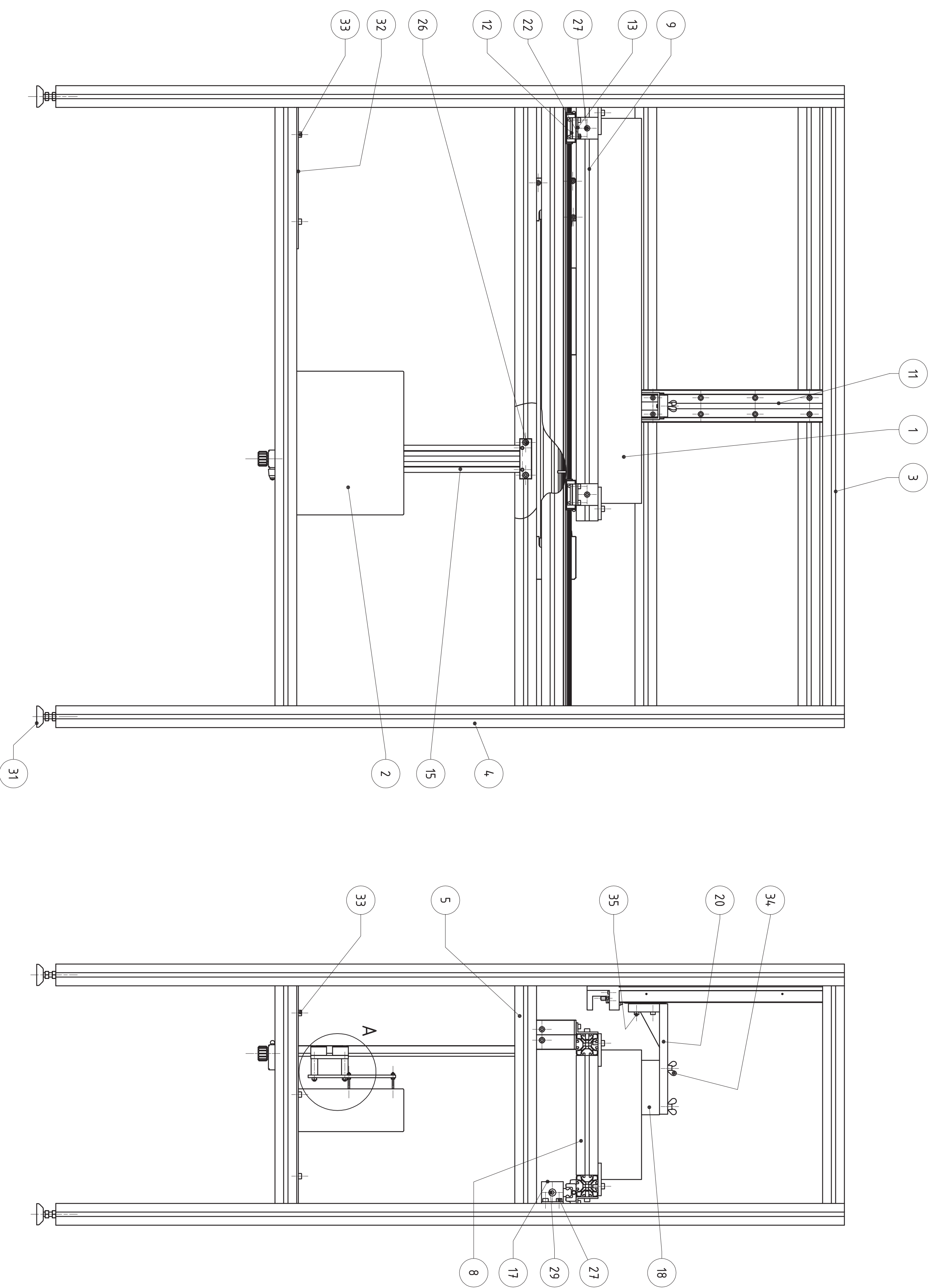
- [27] *THK KR* (katalog) [online]. [cit. 16. května 2014]. Dostupné na:  
<http://pdf.directindustry.com/pdf/thk/lm-guide-actuator-kr/328-6416.html>
- [28] *T.E.A. technik* [online]. [cit. 16. května 2014]. Dostupné na:  
<http://www.teatechnik.cz/linearni-osa-sroubem-nl/>
- [29] *FESTO EGSK* (katalog) [online]. [cit. 25. dubna 2014]. Dostupné na:  
[http://www.festo.com/cat/de\\_de/data/doc\\_engb/PDF/EN/EGSK-EGSP\\_EN.PDF](http://www.festo.com/cat/de_de/data/doc_engb/PDF/EN/EGSK-EGSP_EN.PDF)
- [30] *HENNLICH DryLin W* [online]. [cit. 25. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.hennlich.cz/produkty/kluzna-pouzdra-a-vedeni-linearni-kluzna-vedeni-drylin-w-631.html>
- [31] *HENNLICH HSR* [online]. [cit. 26. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-valiva-motory-a-pohony-linearni-vedeni-valive-konvencni-vedeni-635/typ-hsr.html>
- [32] *HENNLICH* [online]. [cit. 27. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.hennlich.cz/>
- [33] *HENNLICH SLW* [online]. [cit. 27. dubna 2014]. Dostupné na:  
<http://www.hennlich.cz/produkty/kluzna-pouzdra-a-vedeni-linearni-kluzna-vedeni-drylin-sht-633/slw.html>
- [34] *KROKOVÉ MOTORY A JEJICH ŘÍZENÍ* (studijní text). [online]. Liberec: Ing. Pavel Rydlo. Technická univerzita v Liberci, Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů, březen 2000. [cit. 20. dubna 2005]. Dostupné na: <http://www.mti.tul.cz/files/ats/krok2.pdf>
- [35] *4ISP eshop* [online]. [cit. 19. května 2014]. Dostupné na:  
<http://cnc.inshop.cz/>
- [36] *DIY high resolution 3D DLP printer* [online]. [cit. 21. května 2014]. Dostupné na: <http://www.instructables.com/id/DIY-high-resolution-3D-DLP-printer-3D-printer/?ALLSTEPS>

## Seznam příloh

CD s digitální podobou práce včetně příloh

Výkresová dokumentace:

1-KVS-OS-XXX-01-00	3D DLP sestava
4-KVS-OS-XXX-01-01	Distanční podložka projektoru
4-KVS-OS-XXX-01-02	Jokl základní desky
4-KVS-OS-XXX-01-03	Adaptér LJHR - vana
4-KVS-OS-XXX-01-04	Adaptér HSR - vana
4-KVS-OS-XXX-01-05	Držák projektoru
3-KVS-OS-XXX-01-06	Držák základní desky
4-KVS-OS-XXX-01-07	Úhlová spojka rámu
4-KVS-OS-XXX-01-08	Základní deska
4-KVS-OS-XXX-01-09	Zarážka nádrže
4-KVS-OS-XXX-01-10	Závitová tyč pro připojení projektoru



35	4	ŠROUB M5 x 20 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
34	2	ŠROUB M6 x 20 ČSN 02 1365	Šrouby ISO metrické s Křídlové šrouby šestihranem
33	7	ŠROUB M6 x 10 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
32	1	Stůl pro elektroniku	
31	4	Stravěcí pátky 404,008	
30	19	ŠROUB M4 x 20 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
29	2	ŠROUB M8 x 25 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
28	4	ŠROUB M6 x 16 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
27	8	ŠROUB M5 x 14 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
26	4	ŠROUB M6 x 30 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
25	6	MATICE M3 ČSN 02 1402	Šestihrani matice
24	4	MATICE M5 ČSN 02 1402	Šestihrani matice
23	4	ŠROUB M5 x 60 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
22	12	ŠROUB M5 x 10 ISO 4762	Šrouby ISO metrické s hlavou s vnitřním šestihranem
21	3	Závěšovací tyč pro připojení projektoru	4-KVS-05-XXX-01-10 šestihranem
20	1	Držák základní desky	4-KVS-05-XXX-01-06
19	1	Základní deska	4-KVS-05-XXX-01-08
18	1	Jokl základní desky	4-KVS-05-XXX-01-02
17	2	Úhlová spojka rámu	4-KVS-05-XXX-01-07
16	4	Zarážka nádrž	4-KVS-05-XXX-01-09
15	1	SLW-1040	
14	1	Adaptér LjHR - vana	4-KVS-05-XXX-01-03
13	2	Adaptér HSR - vana	4-KVS-05-XXX-01-04
12	1	HSR15	
11	1	KR3306A-0300-H0-00A0	Osa KR33
10	1	LjHR4,0	
9	2	Al profil 104,0x40 L=370	
8	2	Al profil 104,0x40 L=220	
7	4	Distanční podložka projektoru	4-KVS-05-XXX-01-01
6	1	Držák projektoru	4-KVS-05-XXX-01-05
5	6	Al profil 104,0x40 L=400	
4	4	Al profil 104,0x40 L=1450	
3	10	Al profil 104,0x40 L=1100	
2	1	Projektor	Acer H6510BD
1	1	Nádrž	

POZICE NÁZEV ČÍSLO VÝKRESU/POPIS KUSOVNIK

Značka	Dobut	Ukon	Podpis
Měřítko	Norma	Kresla	Průzkum
1:5	Bc. Petr Mlýn	Bc. Petr Mlýn	Křez
Konstrukce	Technická	Schvál.	Datum
23.5.2014			

TU v Liberci

3D DLP SESTAVA

1-KVS-05-XXX-01-00

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

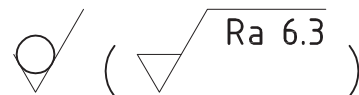
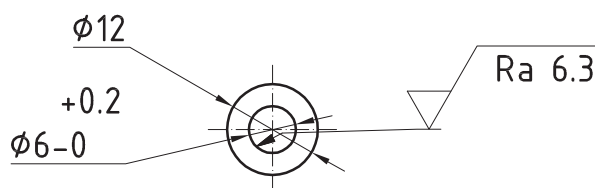
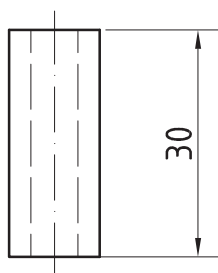
D


E

E

F

F



Rozm.-Polot.				tyč kulatá tažená DIN 1799 $\phi 12 - 160$				PŘESNOST PRESNOST	
				c)		Mater.		ČSN 42 4401 Tř. odp. 818	
				b)		Č. hm.		kg Hr. hm. kg	
				a)				TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
Změna		Datum	Index	Podpisy	 <b>TU v Liberci</b>				
Měřítko	Kusy	Navrhl	Bc. Pavel Mach	Název					
1:1	4	Kreslil	Bc. Pavel Mach	<b>DISTANČNÍ PODLOŽKA PROJEKTORU</b>					
Č.seznamu		Přezkoušel							Typ
Č.sestavy	1-KVS-0S-XXX-01-00	Technolog		Čis.výkresu	<b>4-KVS-0S-XXX-01-01</b>   List 1/1				
Starý výkr.		Normaliz.							
Nový výkr.		Schválil							
		Datum	23.5.2014						

1

2

3

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

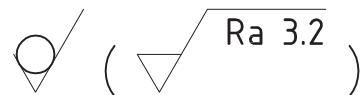
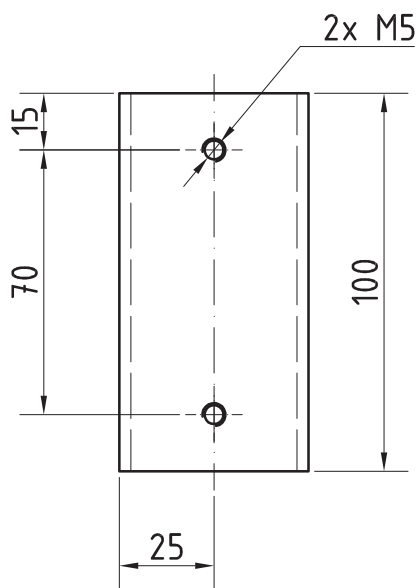
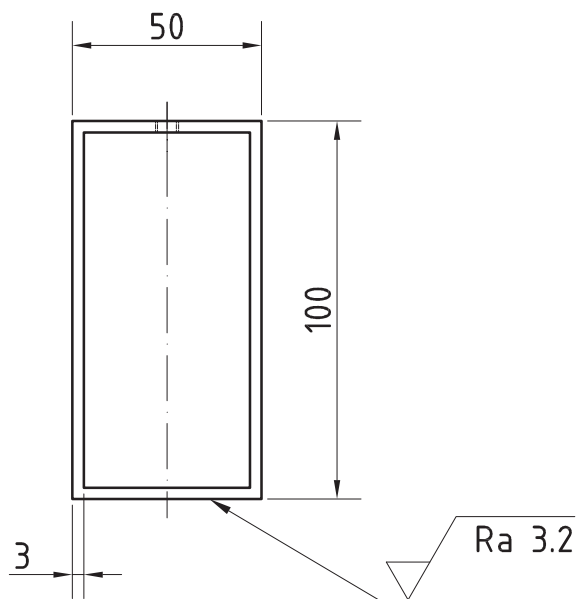
D

E

E

F

F



Rozm.-Polot.   jokl DIN 1748 100x50x3 - 110				PŘESNOST PRESNOST			
				Mater. ČSN 11 373		Tř. odp. 001	
				Č. hm. kg		Hr. hm. kg	
				TOLEROVÁNÍ ISO 8015			
				PROMÍTÁNÍ			
Změna		Datum	Index	Podpisy			
Měřítko	Kusy	Navrhl	Bc. Pavel Mach				
1:2	1	Kreslil	Bc. Pavel Mach				
Č.seznamu		Technolog	Název				
Č.sestavy		Normaliz.	JOKL ZÁKLADNÍ DESKY				
Starý výkr.		Schválil	Typ				
Nový výkr.		Datum	Čis.výkresu				
		23.5.2014	4-KVS-0S-XXX-01-02				
			List 1/1				

1

2

3

4

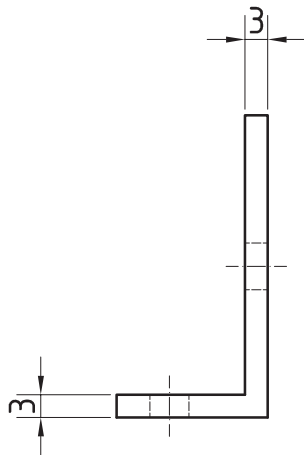
1 2 3 4

A

A

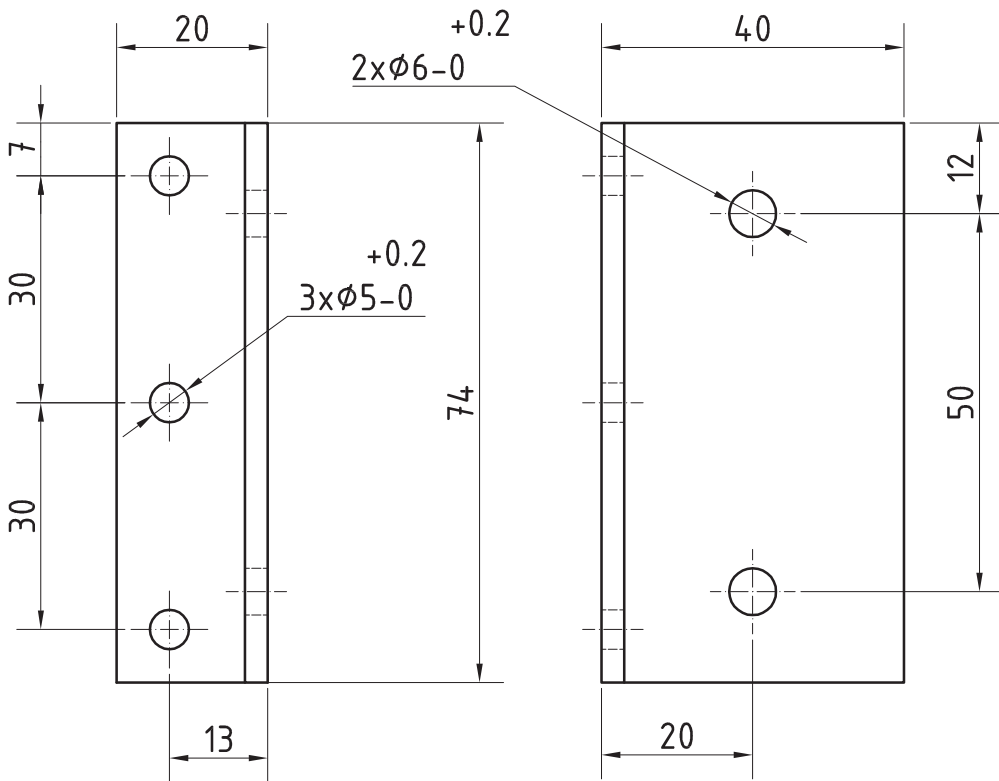
B

B



C

C

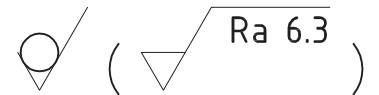


D

D

E

E



F

F

Rozm.-Polot.   L DIN 1748 40x20x3 - 80		c)		Mater.	ČSN 42 4401	Tř. odp.	818	PŘESNOST	PRESNOST
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg	TOLEROVÁNÍ	ISO 8015
		a)						PROMÍTÁNÍ	
Změna		Datum	Index	TU v Liberci					
Měřítko	Kusy	Navrhl	Bc. Pavel Mach						
1:1	1	Kreslil	Bc. Pavel Mach						
		Přezkoušel	Název						
		Technolog	ADAPTÉR LJHR - VANA						
Č.seznamu		Normaliz.	Typ						
Č.sestavy	1-KVS-0S-XXX-01-00	Schválil	Čis.výkresu						
Starý výkr.		Datum	4-KVS-0S-XXX-01-03						
Nový výkr.		23.5.2014	List 1/1						

1 2 3 4



1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

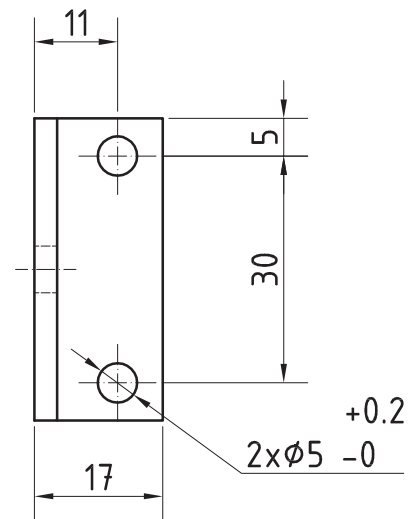
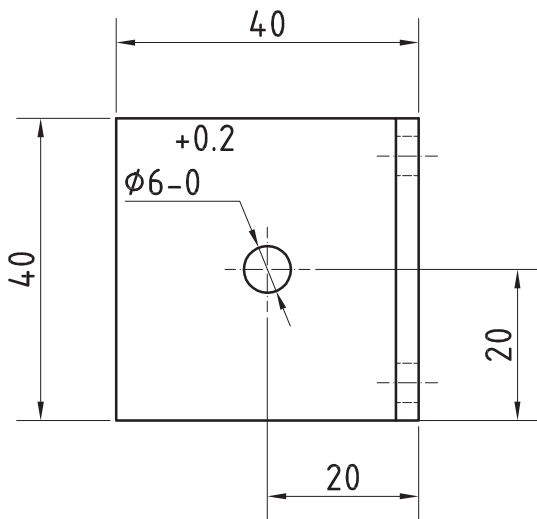
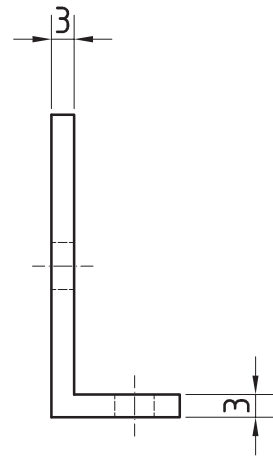
D

E

E

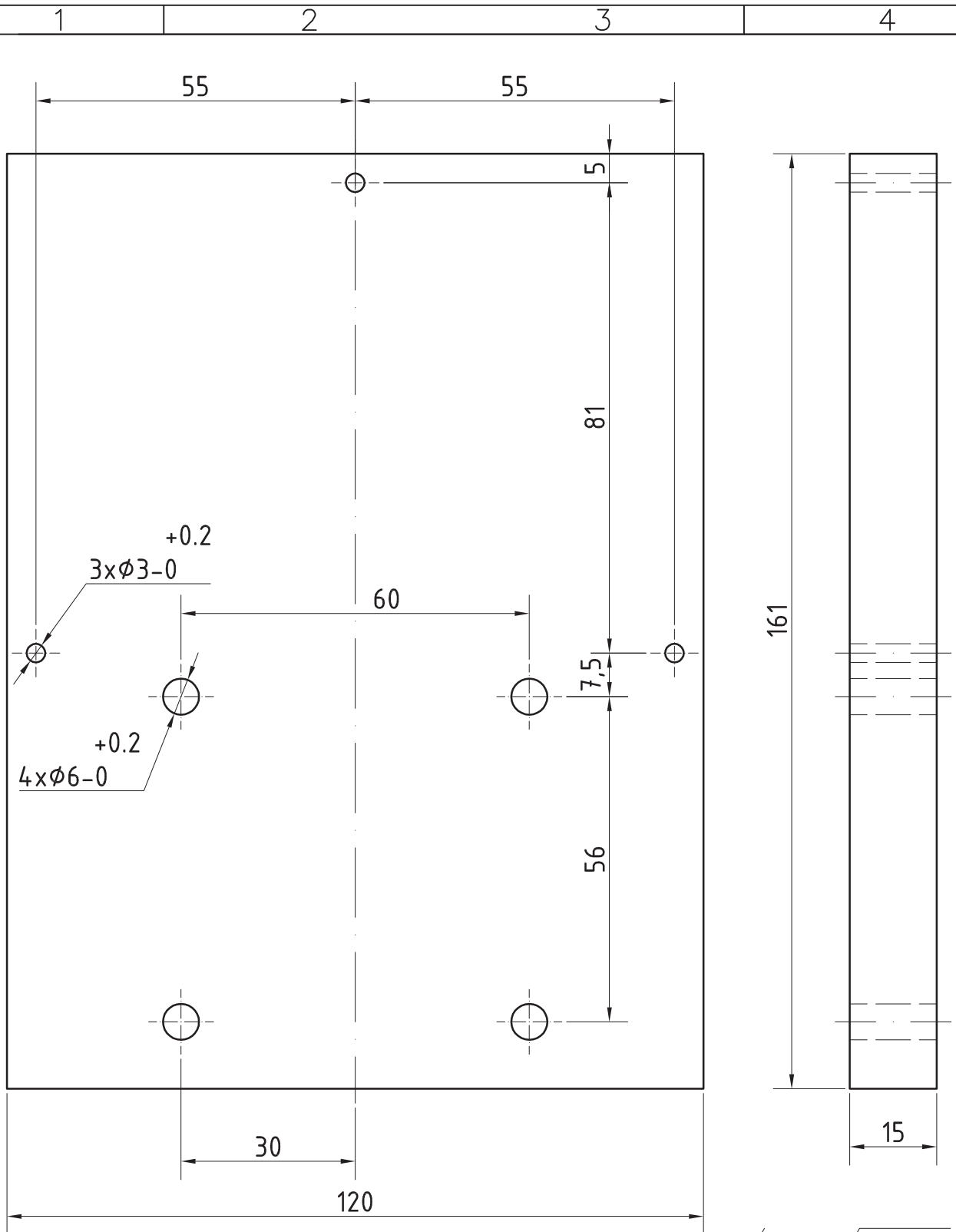
F

F



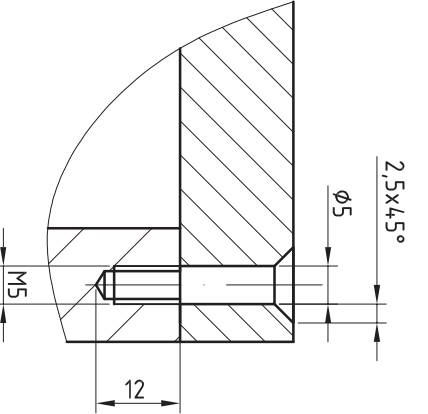
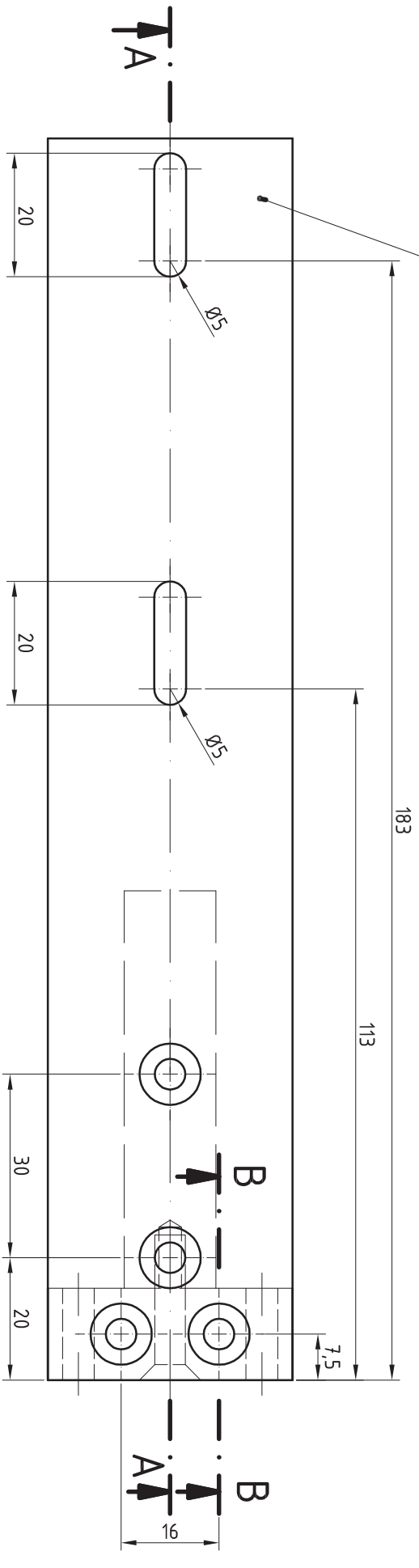
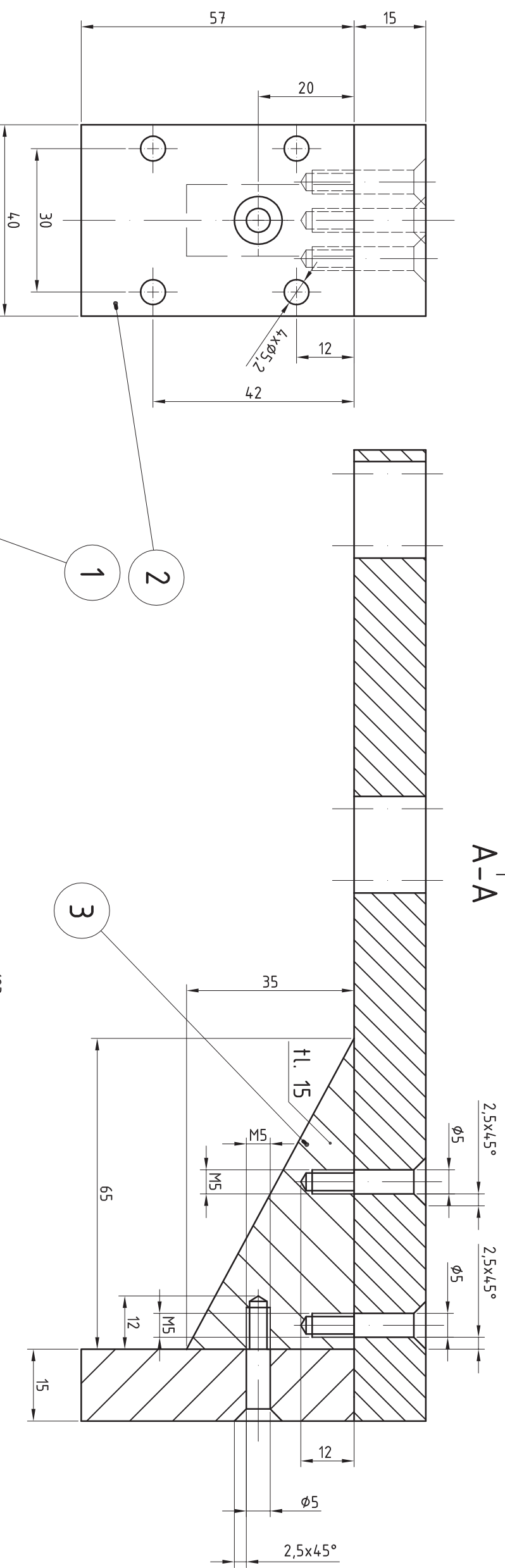
Rozm.-Polot.		L DIN 1748 40x20x3 - 90				PŘESNOST PRESNOST	
		c)		Mater.	ČSN 42 4401	Tř. odp.	818
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
		a)		TOLEROVÁNÍ ISO 8015			
Změna		Datum	Index	Podpisy	PROMÍTÁNÍ		
Měřítka	Kusy	Navrhl	Bc. Pavel Mach		TU v Liberci <b>ADAPTÉR HSR - VANA</b>		
1:1	2	Kreslil	Bc. Pavel Mach				
Č.seznamu		Přezkoušel			Typ		
Č.sestavy	1-KVS-0S-XXX-01-00	Technolog			Čis.výkresu		
Starý výkr.		Normaliz.			<b>4-KVS-0S-XXX-01-04</b>   List 1/1		
Nový výkr.		Schválil					
		Datum	23.5.2014				

1 2 3 4



( Ra 6.3 )

Rozm.-Polot.		PLO DIN 1770 120x15 - 165				PŘESNOST PRESNOST	
		c)		Mater.	ČSN 42 4401	Tř. odp.	818
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
		a)					
Změna		Datum	Index	Podpisy			
Měřítko	Kusy	Navrhl	Bc. Pavel Mach				
1:1	1	Kreslil	Bc. Pavel Mach				
		Přezkoušel					
Č.seznamu	Technolog						
Č.sestavy	1-KVS-0S-XXX-01-00	Normaliz.					
Starý výkr.	Schválil						
Nový výkr.	Datum		23.5.2014				
				TU v Liberci			
				Název <b>DRŽÁK PROJEKTORU</b>			
				Typ <b>4-KVS-0S-XXX-01-05</b>			
				Čís.výkresu <b>4-KVS-0S-XXX-01-05</b>			
				List 1/1			



3	ÚHELNIK	PL0 DIN 1770 4.0x15 - 70	1	KS
2	ZAKLADNA	ČSN 42 4401 PL0 DIN 1770 4.0x15 - 70	1	KS
1	RAMENO	ČSN 42 4401 PL0 DIN 1770 4.0x15 - 210	1	KS
ODK.	OZNAČENÍ VÝKRES	POLOTOVAR MATERIÁL	ČÍS. ZASOBNÍKU POZNÁMKA	MN. JED.

Rozm.-Počet.	PL0 DIN 1770 4.0x15 - 350	Mater.	ČSN 42 4401	Tř. odp.	818	PŘESNOST	PŘESNOST
		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg	TOLEROVÁNÍ	ISO 8015
						PROMĚTÁNÍ	

Změna	Měřítko	Kusů	Datum	Index	Podpisy	Název
1	1:1	1			Bc. Pavel Mach	DRŽÁK ZÁKLADNÍ DESKY

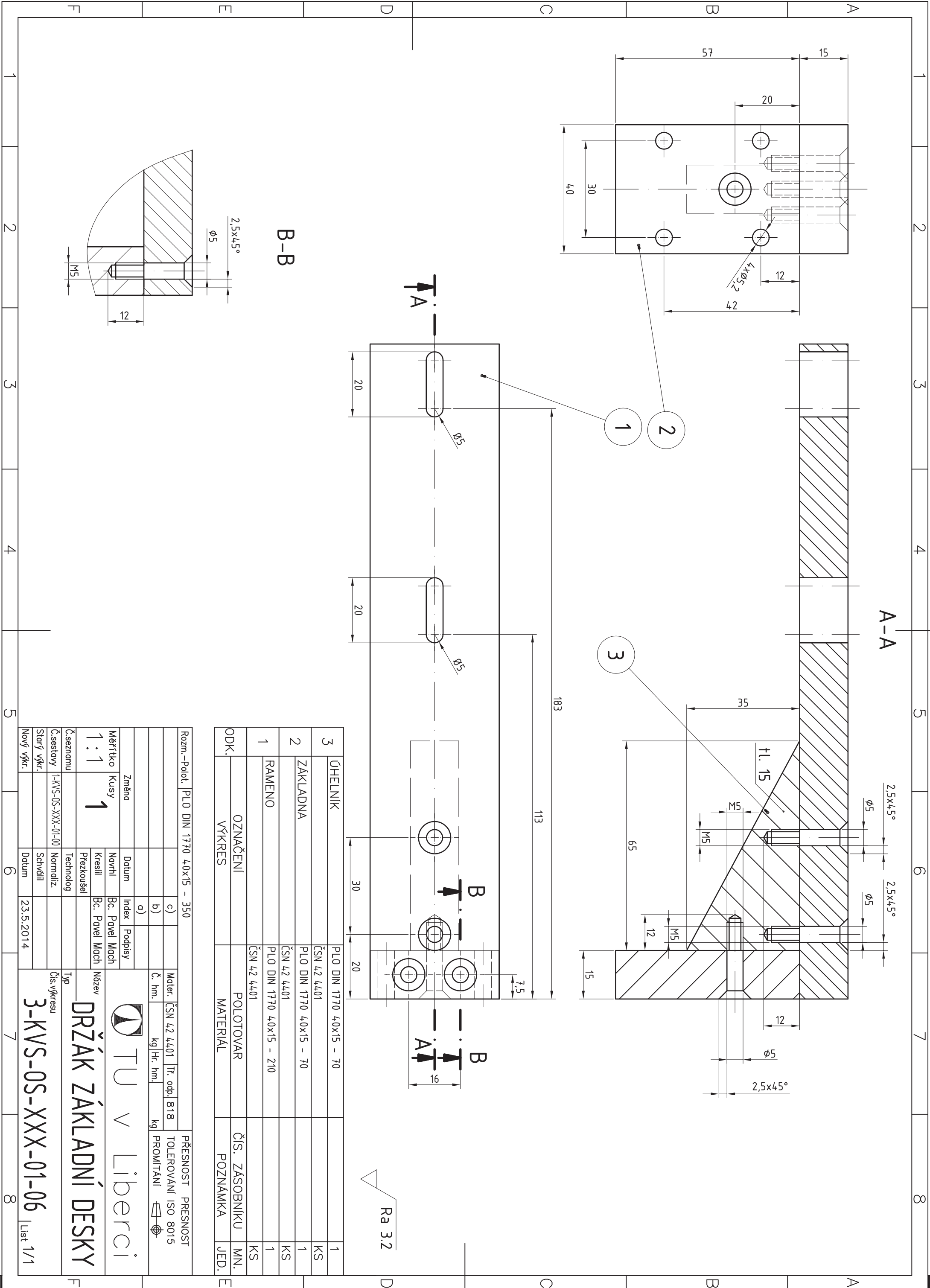
Č. seznamu	Č. sestavy	Starý výkr.	Nový výkr.	Typ
	1-KVS-05-XXX-01-00			Čís. výkresu

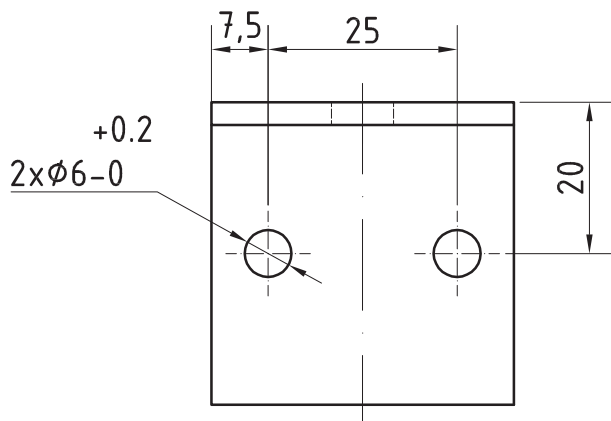
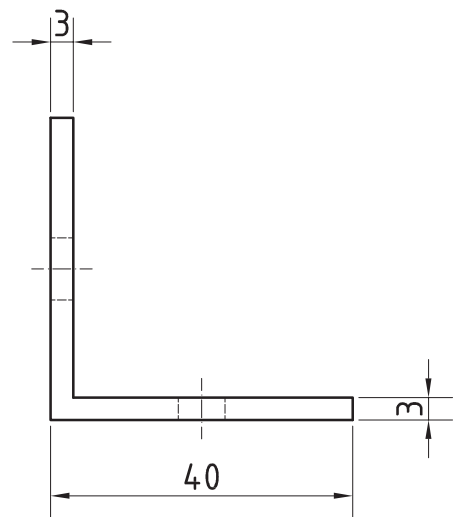
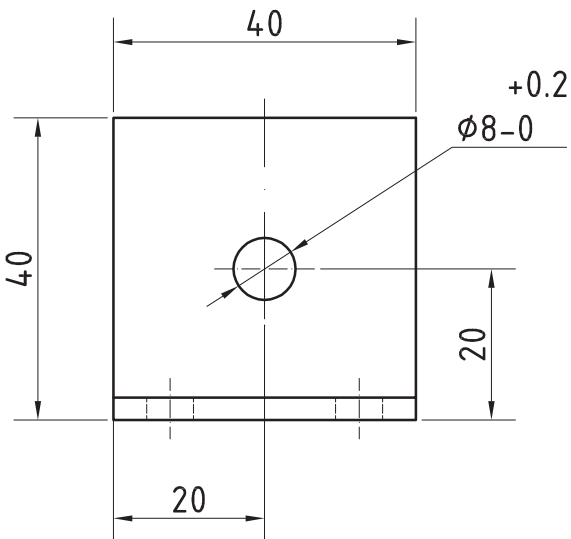
Typ	Čís. výkresu
	3-KVS-05-XXX-01-06

**TU v Liberci**

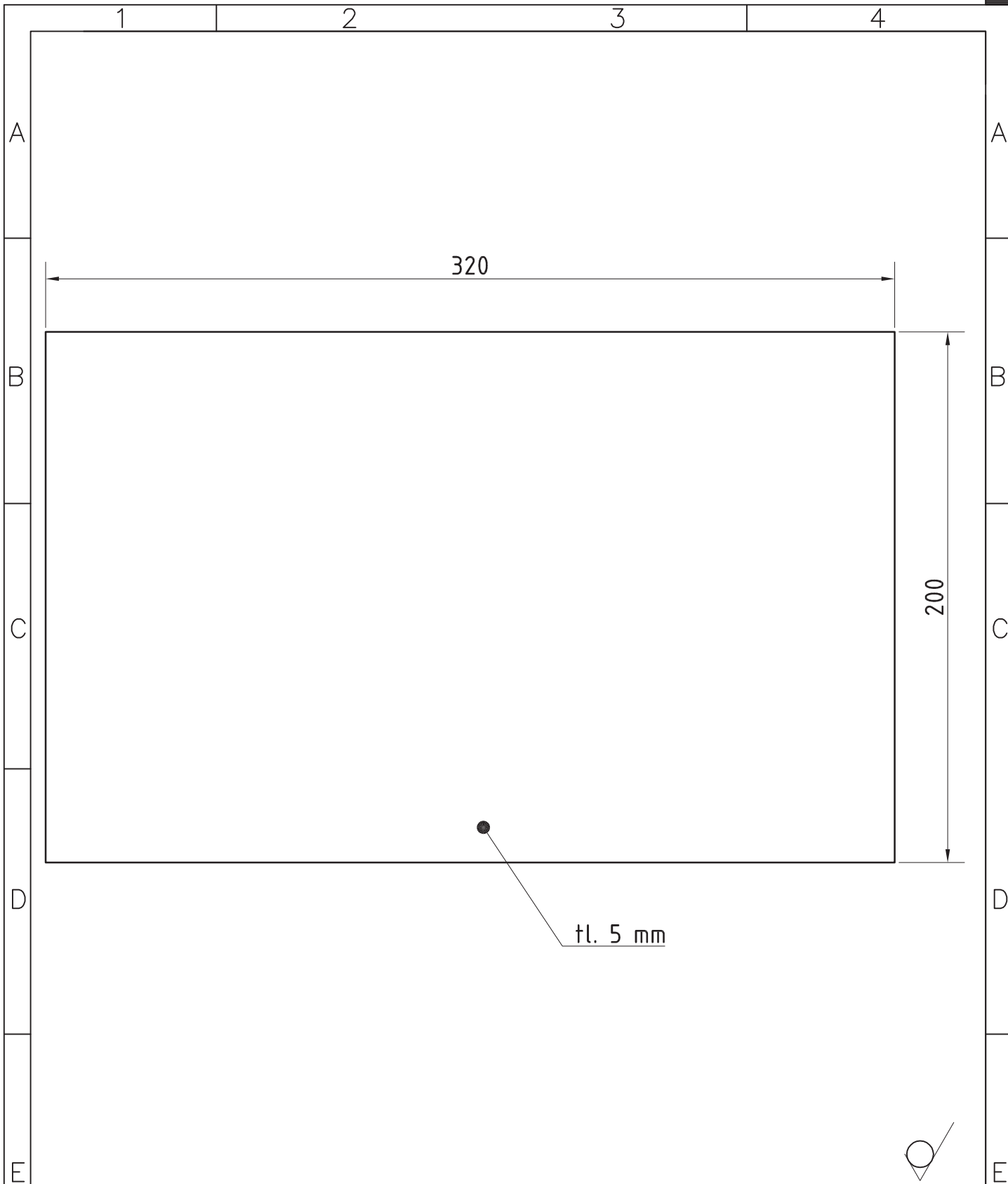
**DRŽÁK ZÁKLADNÍ DESKY**


**3-KVS-05-XXX-01-06**





Rozm.-Polot.   L DIN 1748 40x40x3 - 90		PŘESNOST PRESNOST	
		TOLEROVÁNÍ ISO 8015	
		PROMÍTÁNÍ	
		Mater. ČSN 42 4401 Tř. odp. 818	
		Č. hm. kg Hr. hm. kg	
		a)	
Změna		Datum	Index Podpisy
Měřítka	Kusy	Navrhl	Bc. Pavel Mach
1:1	2	Kreslil	Bc. Pavel Mach
		Přezkoušel	
Č.seznamu		Technolog	
Č.sestavy	1-KVS-OS-XXX-01-00	Normaliz.	
Starý výkr.		Schválil	
Nový výkr.		Datum	23.5.2014
		TU v Liberci Název <b>ÚHLOVÁ SPOJKA RÁMU</b> Typ Čís.výkresu <b>4-KVS-OS-XXX-01-07</b>   List 1/1	



Rozm.-Polot.		skleněná tabule 320x200x5				PŘESNOST		PRESNOST	
		c)		Mater.		sklo		Tř. odp.	
		b)		Č. hm.		kg		Hr. hm.	
		a)						kg	
Změna		Datum		Index		Podpisy		 TU v Liberci <b>ZÁKLADNÍ DESKA</b>	
Měřítko	Kusy	Navrhl		Bc. Pavel Mach		Název			
1:2	1	Kreslil		Bc. Pavel Mach		Typ			
Č.seznamu		Přezkoušel				Čis.výkresu		<b>4-KVS-0S-XXX-01-08</b>   List 1/1	
Č.sestavy	1-KVS-0S-XXX-01-00	Technolog							
Starý výkr.		Normaliz.							
Nový výkr.		Schválil							
		Datum		23.5.2014					

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

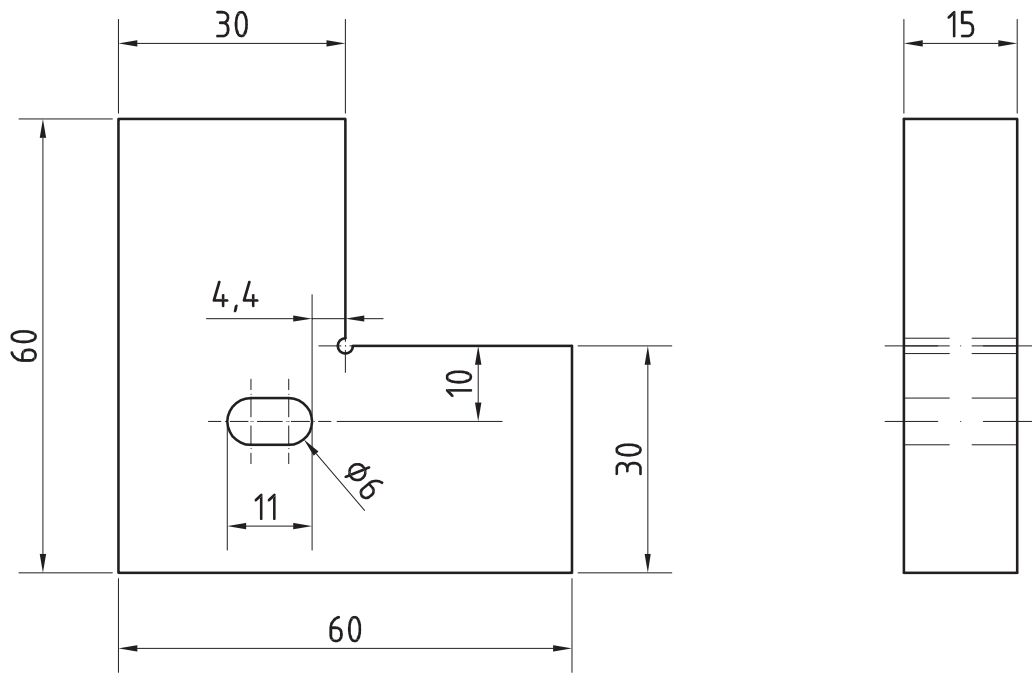
D

E

E

F

F



☑ ( √ Ra 6.3 )

Rozm.-Polot.		PLO DIN 1770 60x15 - 280				PŘESNOST PRESNOST	
		c)		Mater.	ČSN 42 4401	Tř. odp.	818
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg
		a)					
Změna		Datum	Index	Podpisy	TU v Liberci		
Měřítko	Kusy	Navrhl	Bc. Pavel Mach				
1:1	4	Kreslil	Bc. Pavel Mach		Název <b>ZARÁŽKA NÁDRŽE</b>		
Č.seznamu		Přezkoušel					
Č.sestavy	1-KVS-0S-XXX-01-00	Technolog			Typ Čis.výkresu <b>4-KVS-0S-XXX-01-09</b>		
Starý výkr.		Normaliz.					
Nový výkr.		Schválil			List 1/1		
		Datum	23.5.2014				

1 2 3 4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

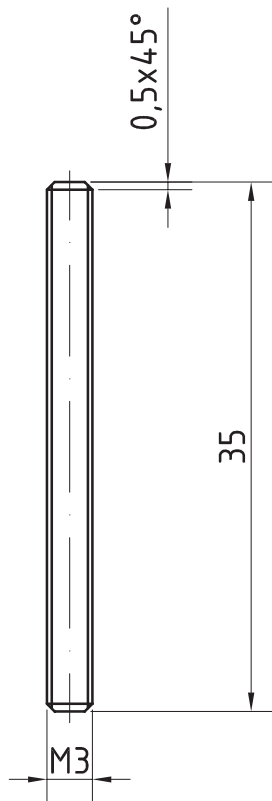
D


E

E

F

F



Rozm.-Polot.		závitová tyč M3 - 110				PŘESNOST		PRESNOST	
		c)		Mater.	ČSN 11 600	Tř. odp.	001		
		b)		Č. hm.	kg	Hr. hm.	kg		
		a)							
Změna		Datum		Index		Podpisy			
Měřítko	Kusy	Navrhl		Bc. Pavel Mach		 <b>TU v Liberci</b> <b>ZÁVITOVÁ TYČ PRO PŘIPOJENÍ PROJEKTORU</b>			
2:1	3	Kreslil		Bc. Pavel Mach					
		Přezkoušel							
Č.seznamu		Technolog				Typ			
Č.sestavy	1-KVS-OS-XXX-01-00	Normaliz.				Čis.výkresu			
Starý výkr.		Schválil				<b>4-KVS-OS-XXX-01-10</b>   List 1/1			
Nový výkr.		Datum		23.5.2014					

1

2

3

4