

UNIVERZITA KARLOVA
Fakulta tělesné výchovy a sportu

**Reprodukce objektů pomocí 3D tisku
v hyperbarickém prostředí**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

Mgr. David Vondrášek

Vypracoval:

Martin Kadlec

Praha, prosinec 2017

Prohlašuji, že jsem závěrečnou bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne

.....

.....

Martin Kadlec

Evidenční list

Souhlasím se zapůjčením své bakalářské práce ke studijním účelům. Uživatel svým podpisem stvrzuje, že tuto bakalářskou práci použil ke studiu a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno a příjmení: Fakulta / katedra: Datum vypůjčení: Podpis:

Poděkování

Děkuji Mgr. Davidu Vondráškovi,
vedoucímu mé bakalářské práce, za vedení, zájem, připomínky a zejména čas, který
mi věnoval.

Děkuji Paulu Holtovi,
výkonnému řediteli Photocentric Ltd, za zodpovězení komplexních otázek týkajících
se resinu.

Děkuji celé Facebookové komunitě WANHAO DUPLICATOR 7,
za pomoc při řešení technických problémů, podnětům k modifikacím a vhodné
realizaci 3D tisku.

Abstrakt

Název: Reprodukce objektů pomocí 3D tisku v hyperbarickém prostředí

Cíle: Bakalářská práce je koncipována jako pilotní studie se zabývala reprodukcí objektů pomocí 3D tisku v hyperbarickém prostředí. Cílem práce je zejména získat dostatečné poznatky na základě kterých bude možné určit smysluplnost dalšího zkoumání této problematiky.

Metody: Využité byly statistické metody třídění za pomoci proprietárního testu do grafů a tabulek, metody popisné a metoda inferenční (T-test).

Výsledky: T-test ($n = 10$) srovnávající hmotnost objektů vytisknutých za atmosférického tlaku ($101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$) a objektů vytisknutých při absolutním tlaku ($150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$) nedeterminoval statisticky signifikantní rozdíl ($p = 0.98026$). Z hlediska věcné významnosti se zkoumaná diference rozdílů ve hmotnosti pohybovala v intervalu $\langle 0,35 \% - 4,37\% \rangle$ a splňovala stanovené kritérium (relativní diferencí hmotnosti $\leq 5 \%$). Proprietárním testem ($n_1 = 10$; $n_2 = 10$) na základě zvolených kritérií funkčnosti prošlo 100% objektů a lze tedy předpokládat, že běžná finančně dostupná 3D tiskárna bude schopna tisku v hyperbarickém prostředí (s tlakem do $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$) a vytisknuté objekty budou schopny plnit svůj ústřední účel. Hlubší zkoumání této problematiky je nutné, avšak dle výsledků se jeví jako smysluplné.

Klíčová slova: 3D tisk, 3D digitalizace, hyperbarické prostředí, 3D tisk v atypických podmínkách

Abstract

Title: Object reproduction by 3D printing in the hyperbaric environment.

Objectives: The bachelor thesis is designed as pilot study examining „Object reproduction by 3D printing in the hyperbaric environment“. Its aim is mainly to acquire sufficient knowledge as precursor to further research in this field.

Methods: Data was organized into tables and charts (based on proprietary test results). Descriptive methods and inferential statistics (T-test) were used to determine hypothesis.

Results: T-test did not determine a statistically significant difference in weight ($p = 0.98026$) between objects printed at atmospheric pressure ($101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$) and objects printed at absolute pressure of $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$. The weight difference of compared build sets was well within substantive significance threshold limit $\leq 5 \%$, $\langle 0,35 \% - 4,37\% \rangle$. All objects (build sets $n_1 = 10$; $n_2 = 10$) did meet the required criteria in proprietary functionality test, therefore we can assume that fairly affordable 3D printer will be capable of printing in hyperbaric environment ($\geq 150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$) and objects will be able to fulfill their main purpose as well. Even though the results are meaningful, further research is needed.

Keywords: 3D printing, 3D digitization, hyperbaric environment, 3D printing in the unusual environment

Obsah

1	ÚVOD.....	12
2	TEORETICKÁ VÝCHODISKA	13
2.1	3D TISK OBECNĚ	13
2.1.1	<i>Historie</i>	13
2.1.2	<i>Nejrozšířenější technologie 3D tisku</i>	16
2.1.2.1	SLS	16
2.1.2.2	SLA	18
2.1.2.3	DLP	19
2.1.2.4	FDM / FFF.....	20
2.1.3	<i>porovnání technologie SLA, SLS a FDM</i>	21
2.2	PROCES OD 3D MODELU K 3D OBJEKTU	22
2.2.1	<i>Preprocessing</i>	23
2.2.1.1	3D model	23
2.2.1.2	Formáty souborů.....	25
2.2.2	<i>Processing</i>	26
2.2.3	<i>Postprocessing</i>	26
2.3	RESIN - TISKOVÝ MATERIÁL METOD 3D TISKU SLA, DLP	27
2.3.1	<i>Polymerizace</i>	27
2.3.2	<i>Fotopolymerizace</i>	27
2.3.3	<i>Daylight resin</i>	28
2.3.5	<i>DAYLIGHT Resin – TEchnická data</i>	29
2.3.6	<i>UV Resin – TEchnická data</i>	30
2.4	3D TISK V ATYPICKÝCH PODMÍNKÁCH	31
2.4.1	<i>3D tisk – mikrogravitace</i>	31
2.4.1.1	FDM 3D tiskárna ISS	32
2.4.2	<i>3D tisk – vakuum</i>	33
2.5	DIGITALIZACE FYZICKÉHO OBJEKTU	34
2.5.1	<i>3D Digitalizace fyzického objektu</i>	34
2.5.2	<i>3D skener</i>	34
2.5.3	<i>Metody 3D skenování</i>	34
2.6	HYPERBARICKÉ PROSTŘEDÍ.....	35
2.6.1	<i>Stavová rovnice</i>	35
2.7	UNDERWATER HABITAT / PODVODNÍ OBYDLÍ.....	36
2.8	ÚKRYTÍ.....	38
2.8.1	<i>Improvizované úkryty</i>	39
2.8.2	<i>Stálé Úkryty civilní ochrany</i>	39
2.8.3	<i>Úkryt s kontrolovaným přetlakem (CBRN ochrana)</i>	40
2.8.3.1	Filtrační systém.....	40
3	CÍLE PRÁCE	41

3.1	CÍLE PRÁCE	41
3.2	ÚKOLY PRÁCE	41
3.3	VĚDECKÉ OTÁZKY	42
3.4	HYPOTÉZY	42
4	METODIKA PRÁCE	43
4.1	VÝZKUMNÝ SOUBOR	43
4.1.1	<i>seznam 3D modelů a objektů</i>	43
4.1.1.1	3D model - Vědecké otázky V_A	44
4.1.1.2	Objekty – Vědecké otázky V_A	45
4.1.1.3	3D modely - hypotéza H_B	46
4.1.1.4	fyzické objekty - hypotéza H_B	56
4.2	SBĚR DAT	57
4.3	ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA DAT	58
4.3.1	<i>Vědecké otázky V_A</i>	58
4.3.2	<i>Hypotéza H_B</i>	58
4.3.2.1	Metody popisné	58
4.3.2.2	Metoda inferenční	59
4.4	STANDARDIZACE PORECESU 3D TISKU A 3D SKENOVÁNÍ VZORKU PRO POTŘEBY EXPERIMENTU 60	
4.4.1	<i>3D skenování</i>	60
4.4.1.1	preprocessing	60
4.4.1.2	processing	60
4.4.1.3	post processing	62
4.4.2	<i>3D Tisk</i>	63
4.4.2.1	preprocessing	63
4.4.2.2	processing	64
4.4.2.3	post processing	66
4.5	VÝZKUMNÉ PROSTŘEDÍ	67
4.6	TEST FUNKČNOSTI	69
4.6.1	<i>3D model V_A</i>	69
4.6.2	<i>Soupis pomůcek</i>	69
4.6.2.1	Zdroj vzduchu – Kompresor, duše s autoventilem	69
4.6.2.2	ŠPUNTY DO UŠÍ	69
4.6.2.3	Zvukoměr	70
4.6.2.4	ČASOVAČ – ODPOČET času	70
4.6.2.5	Redukce - HB9	70
4.6.3	<i>Návod k testu</i>	70
4.6.3.1	Příprava kompresoru	70
4.6.3.2	Zapojení celé soustavy	71
4.6.3.3	Rozmístění A příprava objektů	71
4.6.3.4	Testování	71
4.6.3.5	Vyhodnocování	71

5	VÝSLEDKY	72
5.1	SELEKCE 3D TISKÁRNY, MODIFIKACE A CHARAKTERISTIKY PROSTŘEDÍ	72
5.2	RESIN - TISKOVÝ MATERIÁL	74
5.3	HYPOTÉZA H_B	75
5.3.1	<i>Vstupní data</i>	75
5.3.1.1	Model - HB1	75
5.3.1.2	Model – HB2	75
5.3.1.3	Model – HB3	76
5.3.1.4	Model – HB4	76
5.3.1.5	Model – HB5	76
5.3.1.6	Model – HB6	77
5.3.1.7	Model – HB7	77
5.3.1.8	Model – HB8	77
5.3.1.9	Model – HB9	78
5.3.1.10	Model – HB10	78
5.3.2	<i>T-test a Relativní nepřesnost měření</i>	79
5.3.1	<i>zHodnocení věcné významnosti</i>	80
5.4	ZHODNOCENÍ VĚDECKÉ OTÁZKY V_A	82
6	DISKUSE	84
7	ZÁVĚR	88
	SEZNAM ZDROJŮ	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ	96
	SEZNAM TABULEK	98
	SEZNAM PŘÍLOH	99
	PŘÍLOHA Č. 1 – VYBAVENÍ PRO 3D SKENOVÁNÍ A 3D TISK	I
	PŘÍLOHA Č. 2 – SENAM QR KÓDŮ	IV
	PŘÍLOHA Č. 3 – VÝZKUMNÉ PROSTŘEDÍ	VI
	PŘÍLOHA Č. 4 – DETAIL 3D TISKÁRNY	VII

SEZNAM ZKRATEK

2K - standard pro rozlišení obrazu, horizontálního rozlišení, které je přibližně 2000 pixelů

3D – trojrozměrný / trojdimenzionální

ABS - Akrylonitrilbutadienstyren

ASCII - American Standard Code for Information Interchange (americký standardní kód pro výměnu informací)

ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (standard metod testujících tahové vlastnosti plastů)

ASTM D648 - Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position (standard metod testujících teplotní deformaci plastů pod flexuralní zátěží)

CAD - Computer aided design

CBRN - Chemical, Biological, Radiological, Nuclear (Chemické, Biologické, Radiologické, Nukleární)

CO – Civilní Ochrana

cPs – Centipoise (jednotka dynamické viskozity)

ČOS - ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD

DIY - Do it yourself (udělej si sám)

DLP - Digital light processing

EN ISO - English International Organization of Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)

FDM - Fused Deposition Modeling

FFF - Fused filament fabrication

HEPA - high efficiency particulate air filter (vysoce účinný filtr zachytávající mikročástice)

HW – Hardware (technické vybavení)

HZS ČR - Hasičský záchranný sbor České republiky

ISS - International Space Station (Mezinárodní vesmírná stanice)

Kč - Koruna česká

LCD - liquid crystal display (displej z tekutých krystalů)

Ltd – Limited (forma obchodní společnosti)

NASA - National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a kosmonautiku)

OBJ - object file (formát souboru .obj)

OEM – Original Equipment Manufacturer (Originální výrobce zařízení)

OLED - Organic light-emitting diode (typ displeje využívající technologie organických elektroluminiscenčních diod)

PEI – Polyetherimide

Podpory / podpůrné struktury - fungují coby opora tištěného objektu v prostředí kapalného resinu (nebo jiného tiskového média) v případech, kdy to struktura vyžaduje. Podpůrné struktury musí být po dokončení procesu odstraněny.

PLA - Polylactid acid

PLY - Polygon File Format (polygonový formát souboru)

p_n – normální atmosférický tlak o hodnotě $101,32 \pm 2$ kPa

QR - Quick Response Code (druh maticového čárového kódu)

SKU - stock keeping unit (Skladovací jednotka)

SLA – stereolithography (Stereolitografie)

SLS - selective laser sintering (selektivní laserové spékání)

STL – StereoLithography (formát souborů .stl)

SW – Software (programové vybavení)

USD - United States Dollar (měna Spojených států amerických)

UV – Ultraviolet (ultrafialové záření)

1 ÚVOD

Moderní technologie v oblasti 3D digitalizace a následné reprodukce nejčastěji pomocí 3D tiskárny jsou stejně jako matematika zejména nástrojem, mají sice vlastní účel sami o sobě, ale značně obecný. Jejich hlavní síla tedy spočívá v potenciálu, který nabízí ostatním oblastem lidské činnosti.

Témata ochrany obyvatelstva stejně jako potápění jsou natolik široká, že značně omezuje možnost detailně znát problematiku celého tématu v každém ohledu jen jednomu jedinci. Šance na využití moderních technologií efektivně, které nejsou přímo určeny pro daný obor lidské činnosti a nejsou na první pohled zřejmé její asociace s danou problematikou jsou tedy minimální.

Omezený prostor coby společný jmenovatel nejen nejrůznějších úkrytů a podvodních obydlí, značně omezuje možnost skladování objektů uvnitř, ty jsou pak podle různě důmyslných predikcí vybírány na základě předpokládané důležitosti. Nicméně výběr je již z podstaty slova omezujícím kritériem pro uspokojení všech potřeb a požadavků. Dalším hlediskem je fakt, že v i případě vytvoření dostatečného počtu zásob daného objektu například nástrojů či ochranných prostředků jako jsou nejrůznější masky nebo daleko banálnější objekty jako například brýle není možné zcela reagovat na případy jejich selhání. Hlavním problémem dostupných objektů prostřednictvím skladování je nemožnost reagovat na aktuální potřebu.

Cílem práce je zejména získat dostatečné poznatky na základě kterých bude možné určit smysluplnost dalšího zkoumání této problematiky. Prokázat potenciální možnost využití 3D tisku v hyperbarickém prostředí a případné reprodukce objektu pomocí 3D digitalizace coby premisu pro využití 3D tisku v úkrytu a jiném uzavřeném objektu obdobné funkce.

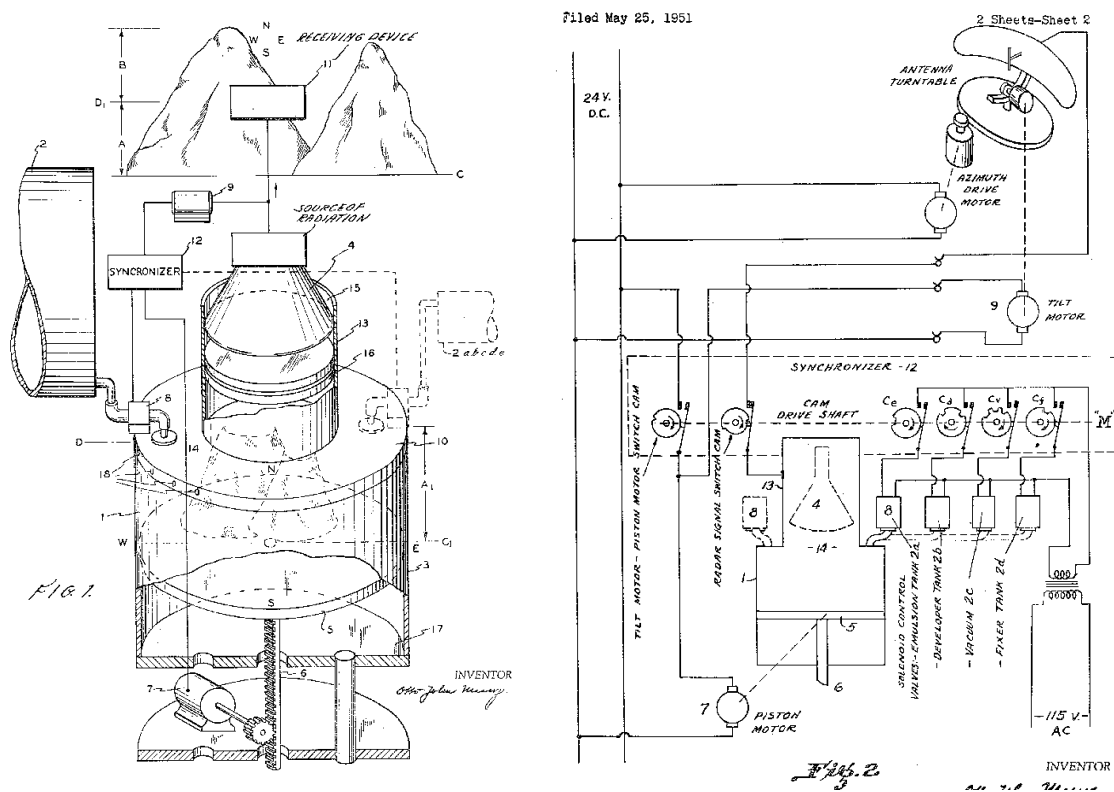
2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

2.1 3D TISK OBECNĚ

3D tisk je proces syntetizace trojrozměrného objektu, který probíhá vrstvením tiskového media na specifickém zařízení (Canessa, 2013). 3D tisk se někdy spojuje s označením „*aditivní výroba*“. **3D tiskárna** je zařízení, které samotný 3D tisk realizuje. K realizaci tisku je využíváno součinnosti hardwarového (dále jen HW) a softwarového (dále jen SW) vybavení korespondujícího potřebami dané technologií 3D tisku.

2.1.1 HISTORIE

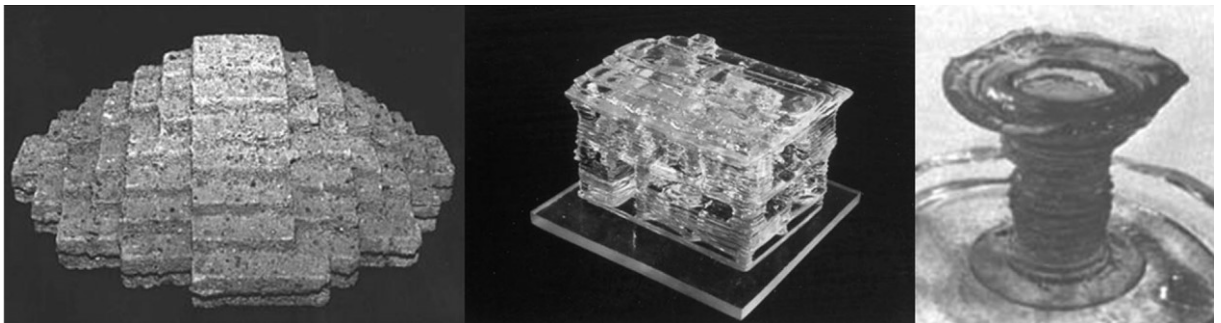
Historie 3D tisku se začala formovat v druhé polovině 20. století, kdy si v roce 1951 Otto John Munz nechal patentovat proces známý jako „*photo-glyph recording*“. Během toho procesu byla selektivně exponována transparentní světlu citlivá emulze, výsledkem čehož byla jednotná vytvrzená vrstva průřezu objektu. Tento proces opakoval tak dlouho, dokud vrstvením nevznikl celý objekt. Velkou nevýhodou byla zdlouhavost zapříčiněná potřebou každou vrstvu ručně zakrývat (Hashmi, 2014).



Obrázek 1: Návrh zařízení pro „photo-glyph recording“ (patent US2775758 A, 1956)

Během následujících let se odehrála celá řada inovací menší významnosti. Za zásadní lze považovat patent R. F. Housholdera z roku 1979, při kterém se využívalo kontrolovaného scanování laserem v prachovém médiu, výsledkem čehož bylo spečení materiálu v požadovaném tvaru. (Hashmi, 2014) Lze se tedy bavit o počátcích selektivního laserového spékání (viz. kapitola „2.1.2.1 SLS“) tak jak ho známe dnes.

Další pozoruhodný moment počátků vývoje zahrnuje metody vyvinuté Hideo Kodamou a Nagoya Municipalem na bázi stereolithographie v roce 1981. Principem bylo směřování paprsku laseru pomocí zrcadel na dvouosém plotteru, následovalo snížení vrstvy modelu objektu o 1 mm do rezervoáru se světlem vytvrzujícím polymerem a proces se opakoval.



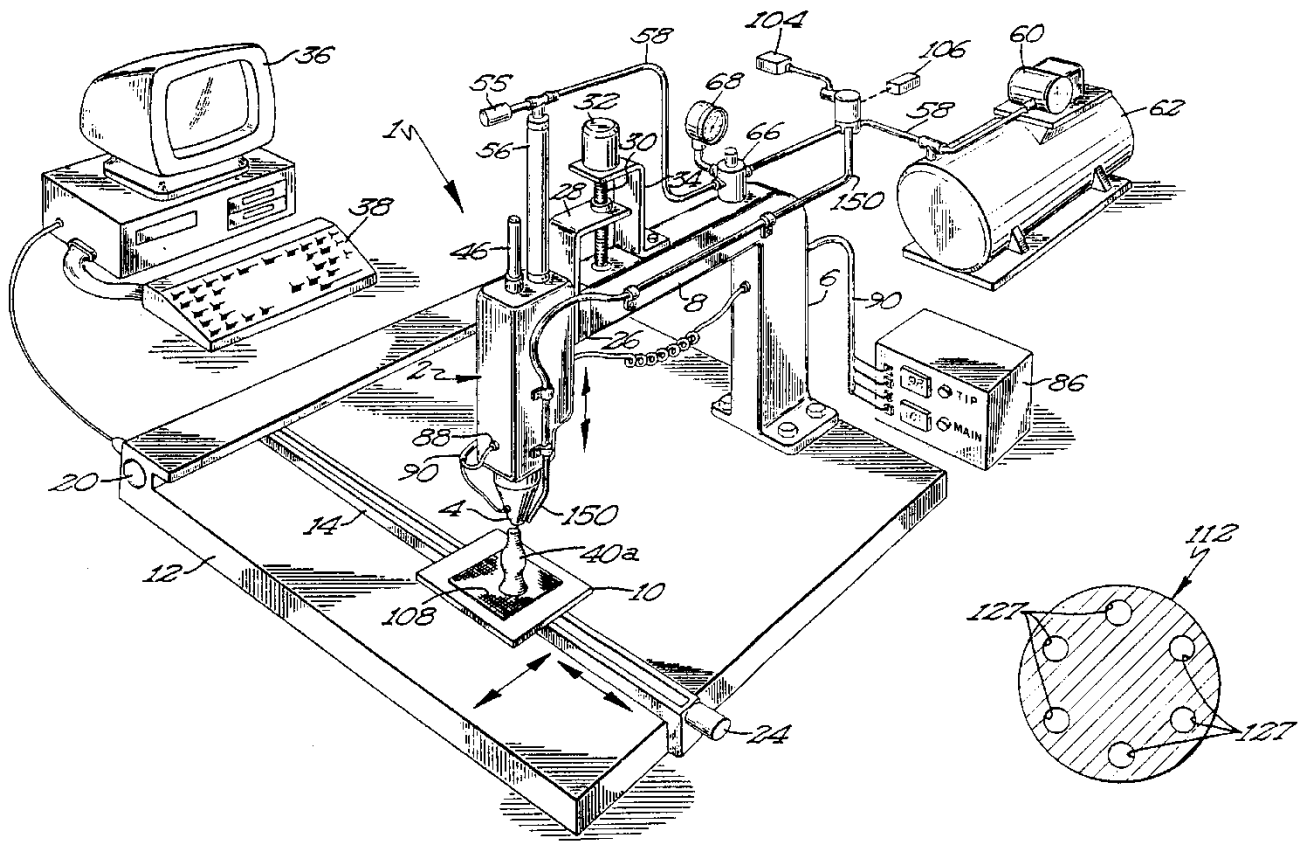
Obrázek 2: Jedny z prvních objektů vyrobených Muncenem a Kodamou. (Hashmi, 2014)

O pouhé tři roky později patentováním metody Chucka Hulla vznikala stereolithographie, fungující na principu koncentrovaného UV (UV – ultrafialové) světla soustředěného na nádobu s fotopolymerem. Tento proces byl řízen počítačem pomocí CAD softwaru (CAD - počítačem podporované kreslení), ve kterém byla v digitální podobě předloha objektu rozřezána do jednotlivých vrstev. Později se celý koncept 3D tisku přenesl do sféry komerční poprvé v celé své historii (Associates, 2014).



Obrázek 3 SLA-1 byl první 3D tiskárnou vynalezenou Hullem. (3DR Holdings, 2016)

S. Scott Crump vyvinul koncem osmdesátých let dnes velmi populární metodu fused deposition modeling také FDM (viz. kapitola „2.1.2.4 FDM / FFF“). Díky které později vznikla principiálně identická metoda FFF (fused filament fabrication) (Associates, 2014).



Obrázek 4 Nákres FDM dle Crumpova patentu (patent US 5121329 A, 1992)

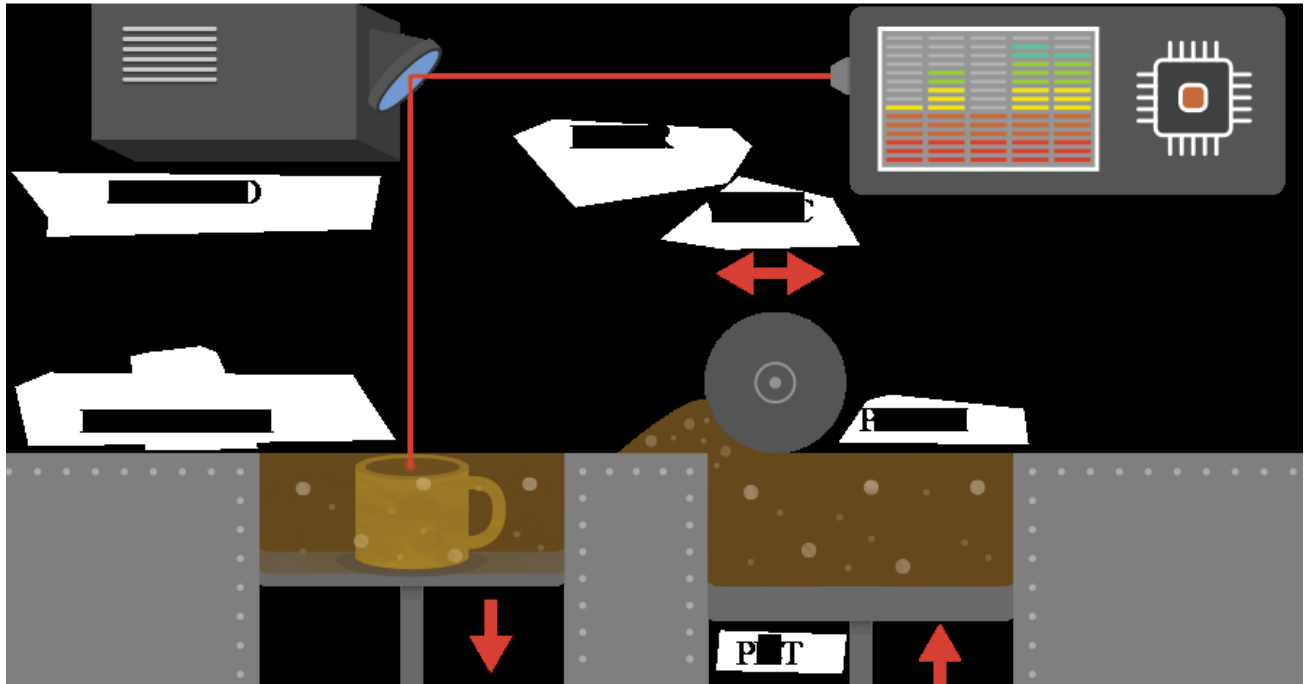
2.1.2 NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU

Nejrozšířenější technologie 3D tisku (vyjma průmyslových technologií) lze zjednodušeně rozdělit na metody využívající principu „*photolithographie*“ tedy vytvrzování fotocitlivého media, „*Fused deposition modeling*“ metody vrstvicí extrudovaný roztavený tiskový materiál a metody kdy se spéká sypké tiskové médium „*Selektivní spékání laserem*“.

2.1.2.1 SLS

SLS neboli selective laser sintering (selektivní spékání laserem) je metoda využívající vysoce výkonný laser ke spékání prachově jemná zrníčka materiálu kterým mohou být např. plasty, sklo, keramika nebo kov (Wikipedia, 2016). Během procesu sintrování je vždy na počátku celého procesu nanesena pomocí válce rovnoměrná vrstva tiskového prachu na výrobní platformu, následně je paprsek laseru nasměrován v osách X – Y pomocí zrcadla tak aby postupně vykreslil celou vrstvu. Při kontaktu laserového paprsku a prachového media dojde k jeho spečení a postupně vznikne spojená vrstva objektu. Po dokončení celé vrstvy se tisková platforma posune o určitý krok dolů a válec nanášející znovu tenkou vrstvu tiskového prachu zahájí další cyklus. Dokončený objekt se očistí od zbytku prachu, omyje a případně se mu zjemní pórovitý povrch (3dprintingindustry, 2016).

SLS je metoda vyznačující se vysokou přesností a zároveň možností pracovat i si exotičtějšími materiály, které mohou mít velkou odolnost ale i celou řadu jiných vlastností. Nevýhodou je relativně velká velikost zařízení a také cena. Tiskárny běžně stojí mezi 12 000 USD – 30 000 USD a náklady tiskového media jsou v řádech stovek USD (machinedesign, 2016).



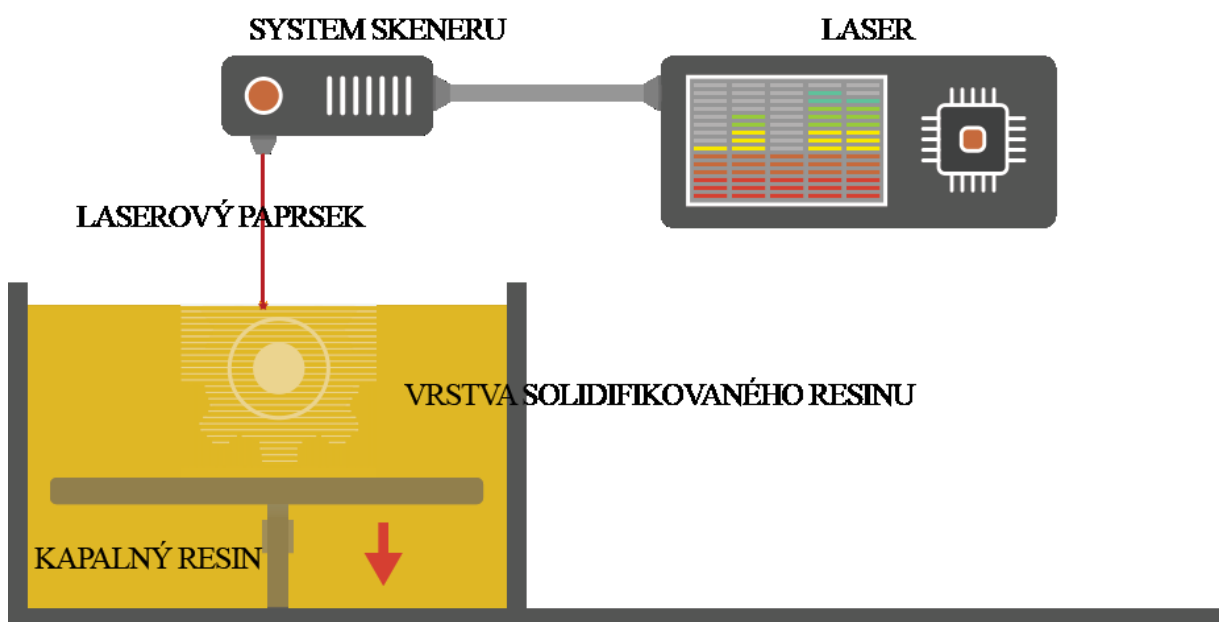
Obrázek 5 schéma znázorňující SLS (3dprintingindustry, 2016)

2.1.2.2 SLA

Stereolithography (česky Stereolitografie) někdy označovaná jen SL, je známa jakožto jedna z prvních technologií 3D tisku, která se komerčně prosadila. Během tohoto procesu je objekt za pomoci laserového paprsku (nejčastěji na bázi UV světla) směřován do rezervoáru podobně jako v případě SLS v osách X – Y a vykresluje postupně vrstvu objektu do tekutého media které je vytvrzováno působením záření, tiskové medium *resin* je založené na bázi fotopolimeru. Jakmile je vrstva dokončena platforma se posune na ose Z o krok odpovídající tloušťce dané vrstvy a na hladině vznikne nová vrstva resinu (3dprintingindustry, 2016). V případě SLA je mimo model samotný využíván systém podpor. „*Podpory*“ nebo také „*podpůrné struktury*“ fungují, aby opora tištěného objektu v prostředí kapalného resinu v případech, kdy to složitější struktura vyžaduje. Podpůrné struktury musí být po dokončení procesu odstraněny.

Stereolitografie je obecně velmi přesná s finanční menší náročností jednotek tisíc USD v případě samotné 3D tiskárny je i výrazně levnější než SLS. Resin se dle výrobce jeho složení pohybuje v řádech desítek USD za 1 (machinedesign, 2016; Wikipedia, 2016).

Hlavním nedostatkem je zejména u některých resinů jejich toxicita a malá variabilita, zapříčiňující značně omezenou odolnost a stálost vyprodukovaných výrobků. Možným řešením, je namísto finálního produktu vytvořit pouze formu pro vstříkávání například polysiloxanu (3d-tisk.cz, 2015).

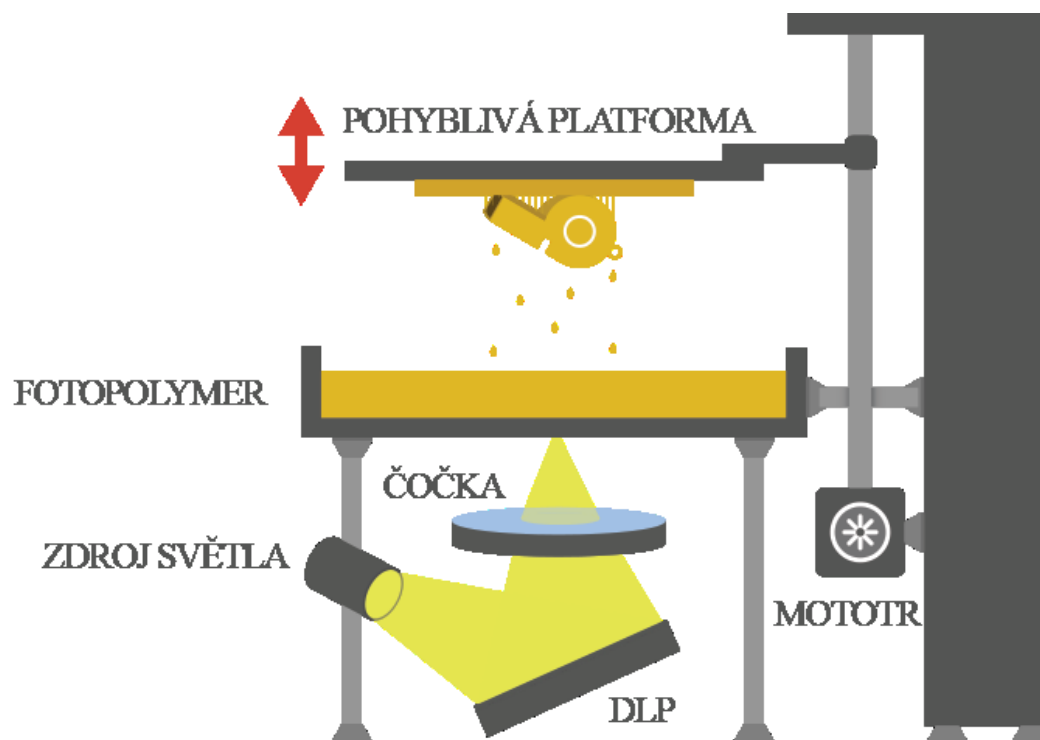


Obrázek 6 schéma znázorňující SLA (3dprintingindustry, 2016)

2.1.2.3 DLP

Digital light processing proces velmi podobný SLA. Hlavním rozdílem je možnost využití konvenčního zdroje světla (OLED, LCD, Oblouková lampa atd.). Světelný zdroj osvítí vrstvu objektu najednou a není ji tedy třeba postupně vykreslovat což může zaručit rychlejší proces samotné výroby.

Možnost využití konvenčních zdrojů světla je také faktorem ovlivňujícím pozitivně cenu takového zařízení pohybující se běžně v rozmezí stovek až tisíců USD. Naopak vyšší nároky jsou kladeny na resin, vzhledem k odlišnému světelnému výkonu jednotlivých zdrojů světla a proměnlivé době potřebné na vytvrzení tisknuté vrstvy mezi jednotlivými 3D tiskárnami (3dprintingindustry, 2016).



Obrázek 7 schéma znázorňující DLP (3dprintingindustry, 2016)

2.1.2.4 FDM / FFF

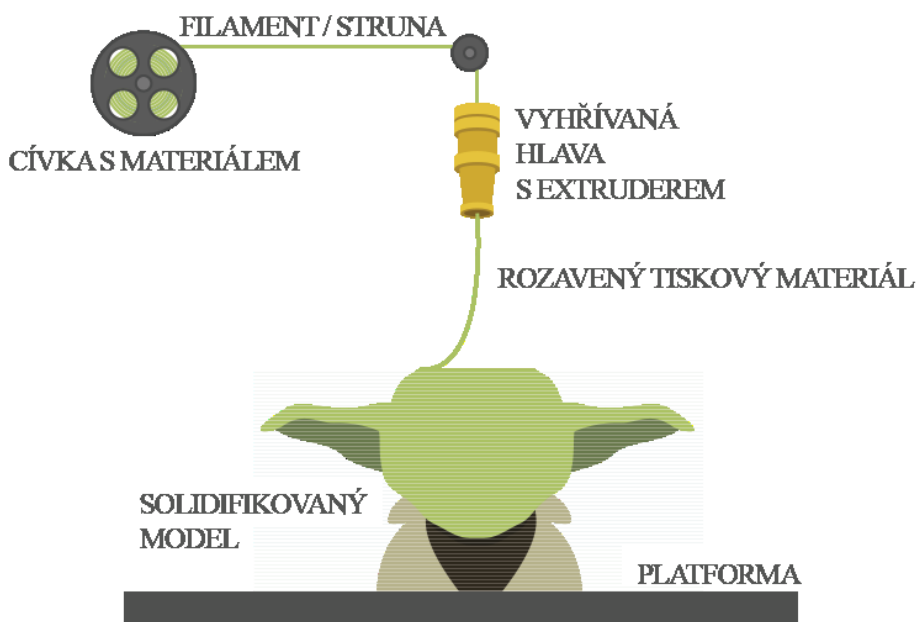
FDM (Fused Deposition Modeling) je metodou 3D tisku od které byl odvozen dnes patrně nejznámější FFF (Fused filament fabrication). U obou procesů dochází k výrobě objektu pomocí tavení tiskového materiálu (filamenta) extruzní hlavou, která jej roztaví při teplotě blízké bodu tání daného tiskového materiálu a postupně v osách X – Y klade na tiskovou platformu. Po dokončení celé vrstvy se pomocí krokových motorů extruzní hlava pohne na ose Z nahoru (3dprintingindustry, 2016).

Tisková platforma bývá pro lepší adhezi první vrstvy často vyhřívána případně ošetřena malířskou páskou, lepidlem, emulzí samotného filamenta nebo kombinací několika metod dohromady.

Stejně jako metody využívající tekutého tiskového media i FDM / FFF potřebuje v určitých případech tisknout podpůrnou strukturu.

Velkou výhodou FDM / FFF je malá finanční náročnost samotného tisku vzhledem k ceně nejpoužívanějších filament (ABS, PLA) a také otevřenosti systému založeného v případě Reprap na open-source licenci (Průša, 2014). Hobby modely lze zkonstruovat za několik málo desítek USD, zatímco profesionální přesto dostupná řešení stojí v řádu jednotek tisíc USD.

Nevýhodou je relativní nepřesnost ve vodorovné rovině a také nutnost post-processingu pro zlepšení finální kvality výrobku. Ve srovnatelné cenové hladině s metodami vycházejícími z photo-litografie je i výrazně složitější tisknout drobné předměty a detaily.



Obrázek 8 schéma znázorňující FDM / FFF (3dprintingindustry, 2016)

2.1.3 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIE SLA, SLS A FDM

	SLA	SLS	FDM
Přesnost tisku (tolerance)	± 0.15 mm (prvních cca 25 mm) ± 0.05 mm (u následujících vrstev)	± 0.3 % (vzhledem k materiálu je spodní hranice ± 0.3 mm)	± 1 % (vzhledem k materiálu je spodní hranice ± 1 mm)
zkroucení během tisku	vysoce pravděpodobné u modelů vyžadujících podpurné struktury	obvykle do 3 %	Závislé na konstrukci 3D tiskárny a použitém materiálu
Smrštitelnost	od 0,5 % do 7 %	obvykle do 3 %	Obvykle do 1 %
Podpurné struktury	Nezbytné pro přesný tisk	Nejsou potřeba	Nezbytné pro převisy nad 45°
Cenová hladina 3D tiskárny	řádově jednotky tisíc Kč a více	řádově desítky tisíc Kč a více	jednotky tisíc Kč a více
Cenová hladina tiskového materiálu	řádově tisíce Kč	řádově tisíce Kč	řádově stovky Kč
Klíčová charakteristika technologie	vhodný tisk objektů do 1dm ³	vhodný tisk objektů nad 1dm ³	Cenová dostupnost

Tabulka 1 – porovnání technologie 3D tisku SLA, SLS a FDM (Redwood, 2016)

Je vhodné brát v potaz, že vzhledem k obrovskému množství 3D tiskáren, tiskových materiálů a rychlosti technologického postupu je tabulka velmi orientační a limitace pramenící z principů technologií se snaží výrobci maximálně minimalizovat. Volba vhodné technologie 3D tisku je značně závislá na konkrétním požadovaném výsledku. Lze říci, že cena je obvykle rozhodujícím faktorem. Od základních DIY (zkratka anglického „*Do it yourself*“ / „Udělej si sám“) stavebnic 3D tiskáren je možné přistoupit až k průmyslovým 3D tiskárnám.

2.2 PROCES OD 3D MODELU K 3D OBJEKTU

Proces vedoucí k výslednému 3D objektu je řadou tří hlavních fází poměrně komplexního charakteru zahrnující vše od tvorby 3D modelu a práce s ním (skenování, modelování, editování), po převod do G-codu pro komunikaci se samotným hardwarem zprostředkovaného firmwarem (mikroprogramové vybavení) kontrolujícím průběh 3D tisku a případnou po tiskové opracování neboli postprocessingu.

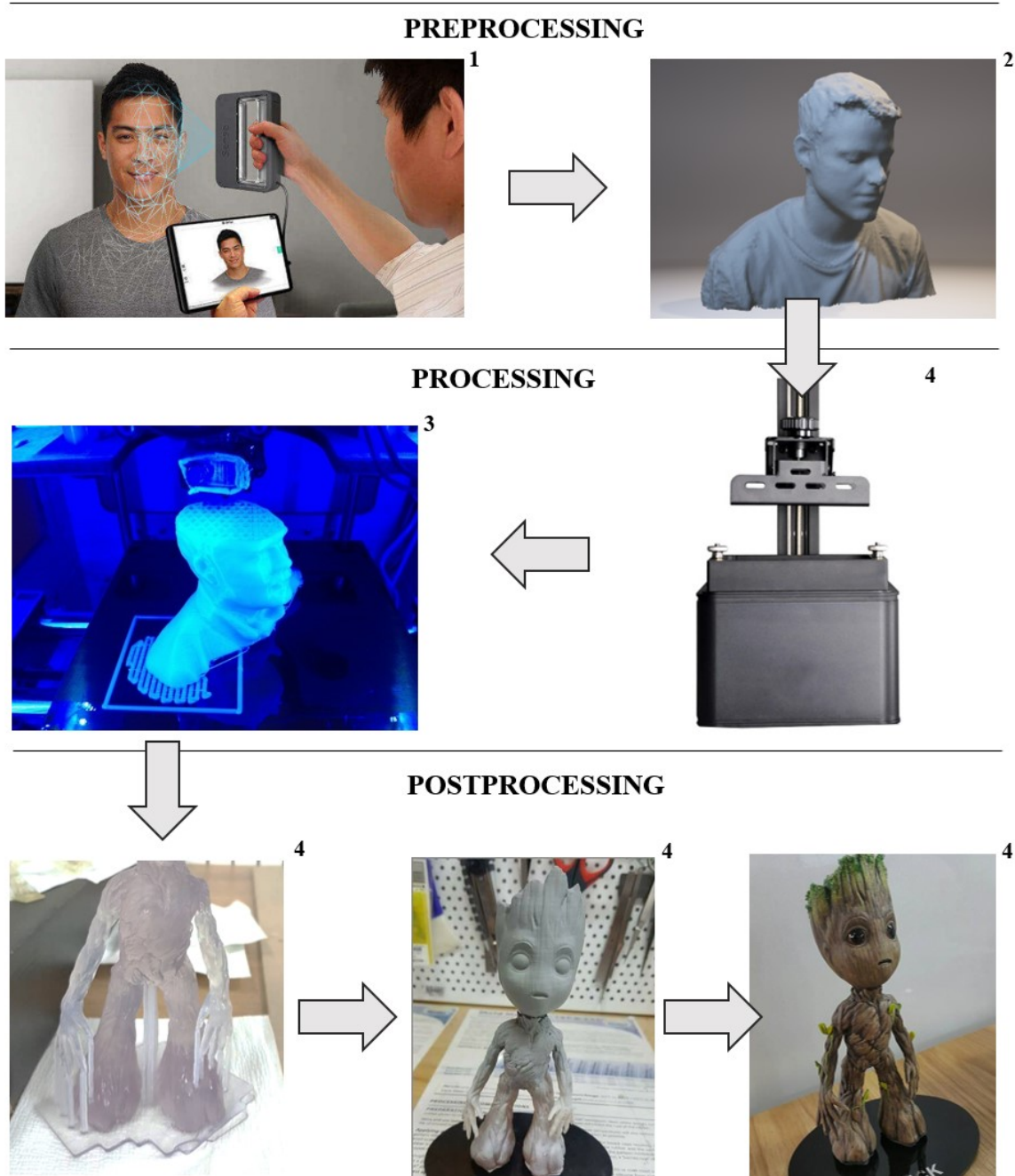


Schéma 1– Znázorňující komplexnost procesu 3D tisku

1 - (3dsystems, 2016); 2 - (vlastní archiv, 2017); 3 - (autodesk, 2016); 4 - (archiv wanhao duplicator 7, 2016)

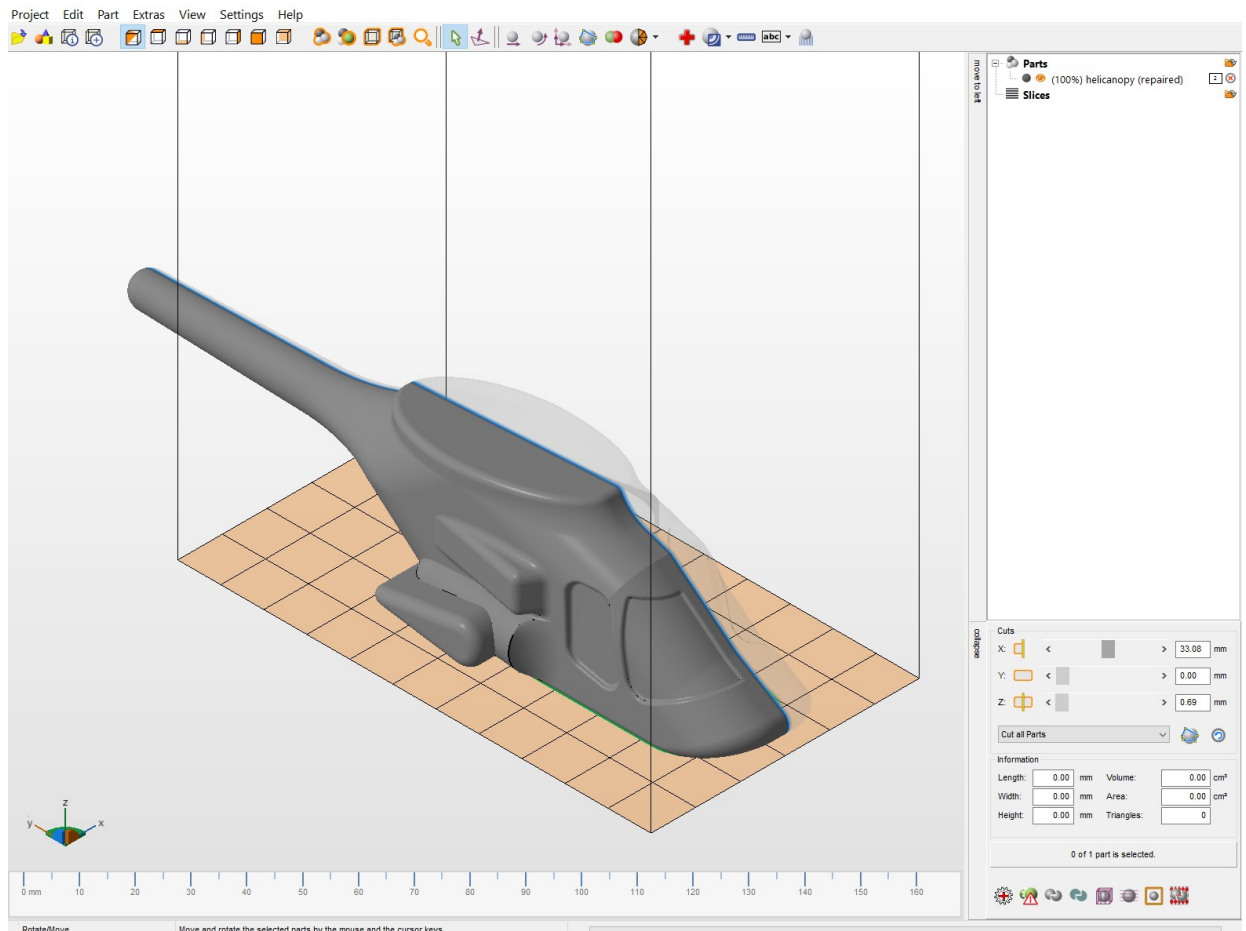
2.2.1 PREPROCESSING

Preprocessing zahrnuje vše co předchází samotné realizaci 3D tisku. Jmenovitě jde zejména o fáze modelování, editování a konverze datových souborů. Výstupem je sada instrukcí pro 3D tiskárnu v kódu programovacího jazyka zvaného G-code.

2.2.1.1 3D MODEL

3D model je možné získat jednak modelováním, digitalizací již existujícího reálného objektu některou z dříve popsaných metod, potažmo stáhnout hotový např. z banky 3D modelu. Pro modelování se využívá sw (software - programové vybavení), který lze velmi hrubě rozdělit na programy určené pro uměleckou tvorbu a programy sloužící primárně strojírenskému / technickému modelování. Klasickými zástupci jsou:

- Blender – populární sw schopný tvorby velmi komplexních modelů. Je vhodný zejména pro fotorealistické modely a velmi propracované renderování. Nebyl ovšem primárně navržen pro modely určených k 3D tisku a tak nenabízí možnost různých alertů o možné kolizi objektu a obecně nepomáhá tolik odstranit lidskou nedbalost, která by mohla vést k deformacím výsledného objektu.
- Maya – sw umožňující rychlou tvorbu 3D modelů, včetně jejich animace, simulací a renderování výstupů.
- Rhino 5 – komplexní program rozšířený pro velmi dobrý poměr ceny a výkonu spojující funkce často typické pro vícero programů.
- OpenSCAD – program specifický přístupem k modelování, využívá příkazovou řádku a 3d model je vytvořen skriptem obsahujícím geometrické definice.
- AutoCAD – v základní verzi program charakterizující strojírenský sw v jeho elementární podobě. Autocad má řadu derivátů pro specifické účely.
- Netfabb – program specificky zaměřený na 3D tisk s možností základní editace, opravy modelu, analyzování a opravy souborů.



Obrázek 9 - 3D model vrtulníku Bell 222 v programu Netfabb (vlastní archiv, 2016)

- Mesh lab – open source program s velmi jednoduchou obsluhou umožňující zpracovávat tzv. trojúhelníkové meshe (shluky) vzniklé například při digitalizaci objektu.
- 123D – program ideální pro základní projekty, velmi intuitivní rozhraní umožňuje práci s 3D modely pro tisk i naprostým začátečníkům. Je dostupný zdarma a má vybudovanou dostatečně rozlehlou komunitu.
- Google SketchUP – doslova hravý nástroj pro kreslení a základní modelování, který je mimo jiné zdarma dostupný spolu s pluginem pro exportování do formátu .stl pro 3D tisk. (Bernier, 2015)

2.2.1.2 FORMÁTY SOUBORŮ

Existuje nespočetné množství formátů se kterými se během 3D tisku pracuje. Většina z nich slouží coby kontejner pro uchování informací o 3D modelu. S postupným rozvojem trhu s 3D tiskárnami došlo i k vzniku velkého množství proprietárních formátů, které nemají většinou na rozdíl od průmyslových 3D tiskáren věcné opodstatnění a často fungují jako značná bariéra vzájemné kompatibility, na druhou stranu existuje i řada formátů, které lze dnes brát za standard v rámci 3D tisku:

- STL - Standard Tessellation Language formát odvozený Stereolithografického sw původně sloužící pro stejnojmennou techniku 3D tisku SLA. Dnes se považuje za základní a je podporovaný největším množstvím sw nástrojů pro 3D tisk stejně jako samotnými 3D tiskárnami.
- OBJ – Osvědčený zavedený formát pro 3D modely sloužící zejména u profesionálních nástrojů k uchování komplexních informací, které převyšují potřeby samotného 3D tisku, ale přesto některé tiskárny umožňují již nativní podporu .obj formátu.
- PLY - Polygon File Format jak je již z názvu patrné tento formát uchovává informace o 3D objektu pomocí sítě vzájemně propojených polygonů. Jde o evoluci formátu .obj s možností uchovat také rozšiřující vlastnosti objektu mezi které patří barva, průhlednost, a dokonce i textura ve verzi Binary i ASCII (binární data nabízí efektivnější poměr mezi velikostí souboru a množstvím uchovaných informací v porovnání s ASCII). Tyto parametry mu předurčují spíše využití pro modelování samotné stejně jako pro ideální formát k uložení informací získaných o objektu při digitalizaci 3D skenery než pro koncový formát vhodný k 3D tisku. (Bernier, 2015)

2.2.2 PROCESSING

Fáze označována jako processing je postupné zpracovávání instrukcí G-codu 3D tiskárnou (odpovídající dané technologii 3D tiskárny) tvořící samotnou výrobu modelu tedy 3D tisk.

2.2.3 POSTPROCESSING

Postprocessing – po výrobní nebo konkrétně po tiskové opracování vzniklého 3D objektu. Jednotlivé kroky opracování 3D objektu jsou určeny převážně požadovaným výsledkem a také zvolenou technologií 3D tisku. U metody SLA je obvykle vytisknutý 3D objekt zbavit zbytků fotocitlivého polymeru, který není žádoucí (například v roztoku na bázi etalonu, nebo pomocí ultrazvukové čističky s roztokem teplé vody a mýdla či saponátu) pokud bylo nutné použít podpurné struktury je třeba je odebrat typicky mechanicky pomocí kleští (případně pouze odlomit). Někdy navíc samotný resin vyžaduje pro získání deklarovaných vlastností dodatečné vytvrzení (expozicí zářením příslušné vlnové délky po dobu několika minut, ale i hodin). Vytisknutý 3D objekt je možné následně lakovat, galvanizovat nebo jen zjemnit povrchovou strukturu. U metody 3D tisku FDM je při povrchové úpravě materiálu PLA s oblibou využíváno vyhlazování jednotlivých vrstev pomocí acetonu, podpurné struktury je možné odstranit mechanicky jako u metody SLA případně je rozpustit (pokud je 3D objekt z jiného materiálu než podpurné struktury a materiál podpurných struktur to umožňuje). Mezi základní kroky opracování po tisku pomocí metody SLS lze zařadit zbavení 3D objektu přebytečného nespečeného prachu tvořící tiskové medium případně jeho odstranění vibracemi.



Obrázek 10 – Dodatečné vytvrzování objektů pomocí UV světla (vlastní archiv, 2017)

2.3 RESIN - TISKOVÝ MATERIÁL METOD 3D TISKU SLA, DLP

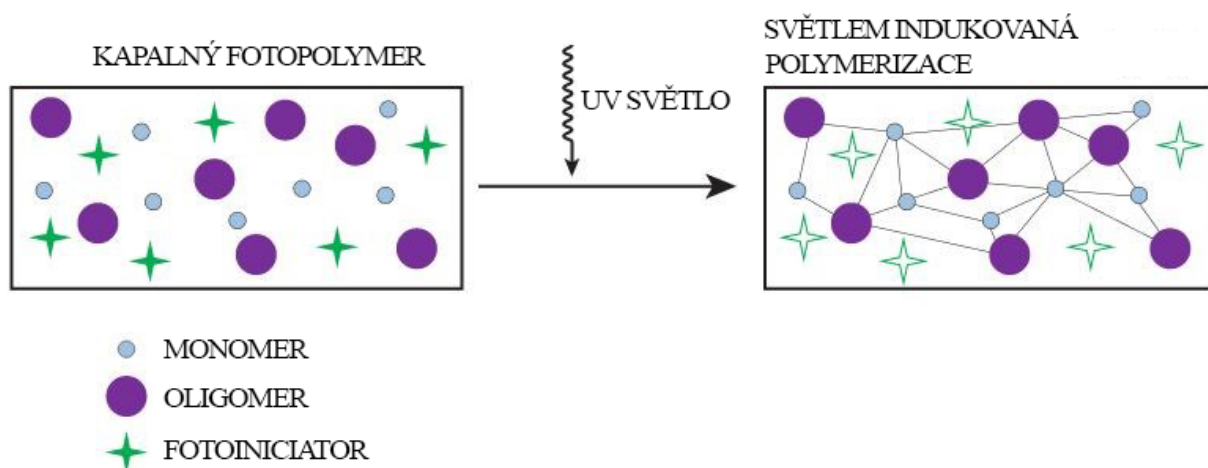
Materiál využívající se k 3D tisku u 3D tiskáren založených na metodách SLA a DLP (případně jejich derivátech) se nejčastěji označuje jako resin, v českých podmínkách je možné se někdy setkat s označením „tisková pryskyřice“. Obecně se jedná o materiál pro 3D tisk založený na polymerizaci.

2.3.1 POLYMERIZACE

Polymerizace někdy označována jako polymerace je jednou ze specifických chemických reakcí, při níž se monomery mění na polymery tedy mnohonásobná adice (Eluc, 2016). Jde o nadřazenou reakci samotné fotopolymerizaci a je využívána v široké škále oborů nejen ve strojírenství a 3D tisku jako takovém.

2.3.2 FOTOPOLYMERIZACE

Fotopolymerizace je polymerizace aktivována nejčastěji UV světlem případně viditelným spektrem elektromagnetického záření. Fotoiniciátorem rozumíme substanci, která iniciuje chemickou reakci pohlcením fotonu (Savla Associates, 2014).

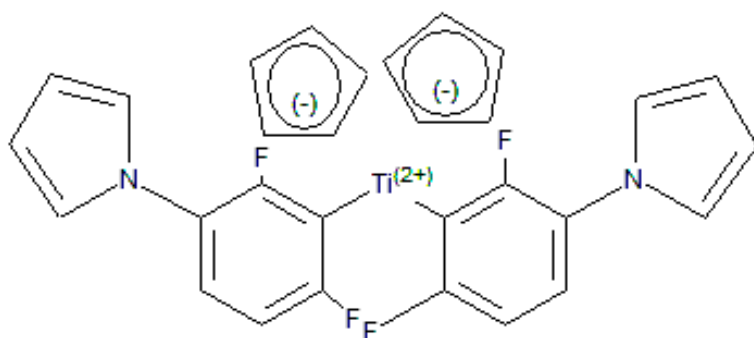


Obrázek 11 - ilustrativní nákres fotopolymerizace (Photopolymer, 2016)

2.3.3 DAYLIGHT RESIN

Daylight resin je označení tiskového media vyvinutého firmou Photocentric Ltd, které má vlastnosti srovnatelné s běžným resinem pro DLP / SLA tiskárny. Zásadní odlišností spočívající v citlivosti i na záření specifického spektra produkovaného běžným LCD či OLED panelem, kterým je dnes vybavena naprostá většina spotřební elektroniky využívající zobrazovací výstupní zařízení (mobilní telefony, tablety, notebooky).

Proces vytvrzování vychází z klasické fotopolymerizace nicméně přidáním bis(h5cyclopentadienyl)-bis[2,6-difluor-3-(pyrrol-1-yl)fenyl]titanu (sumárním vzorcem značeným jako C₃₀ H₂₂ F₄ N₂ Ti¹) (eurochem, 2016) docílila laboratoř spolupracující s Photocentric Ltd optimalizace resinu. Optimalizace zvýšila jeho citlivost na fotony natolik markantně, že pro vytvrzení postačuje záření o vlnové délce odpovídající běžně viditelnému spektru světla lidským okem. (photocentric3d, 2016)



Obrázek 12 - komplexní stavba molekuly bis(h5cyclopentadienyl)-bis[2,6-difluor-3-(pyrrol-1-yl)fenyl]titanu (eurochem, 2016)

Podle poznatků z praxe se ovšem jeví, že zvýšená citlivost resinu sebou může nést několik nevýhod. Sníženou mechanickou odolnost (oproti resinům vyžadující k vytvrzení záření o kratší vlnové délce), rychlejší proces degenerace při přímé expozici slunečnímu záření, nemožnost dosáhnout neutrálně zbarveného průhledného materiálu a v neposlední řadě pro dostatečné vytvrzení tisknuté vrstvy je potřebný výrazně delší čas.

2.3.5 DAYLIGHT RESIN – TECHNICKÁ DATA

Označení	Viskozita ₁	Tvrdość ₂	Pevnost v tahu ₃	Pevnost v tahu ₄	Tahový modul ₅	Délkové prodloužení ₆	Teplotní deformace ₇	Hustota
BR3D-DL-HARD	230 cPs	80 Shore D	15 MPa	42 MPa	2060 MPa	8.7%	60°C	1.19 g/cm ³
BR3D-DL-FIRM	560 cPs	65 Shore D	10 MPa	26 MPa	1060 MPa	14.9%	52°C	1.18 g/cm ³
BR3D-DL-FLEX	200 cPs	85 Shore A	1,5 MPa	4,9 MPa	-	75%	-	1.18 g/cm ³
BR3DGY01-DL-HTENSILE	510 cPs	80 Shore D	22 MPa	65 MPa	-	4%	63°C	1.16 g/cm ³
BR3DGY01-DL-Tough	470 cPs	60 Shore D	10 MPa	35 MPa	-	50%	-	1.14 g/cm ³
BR3D5KG-PF-PRO	260 cPs	60 Shore D	9 MPa	20 MPa	-	20%	-	1.17 g/cm ³
BR3D-DL-CASTABLE	230 cPs	75 Shore D	15 MPa	42 MPa	2060 MPa	8.7%	-	1.19 g/cm ³

Tabulka 2– Technické parametry jednotlivých druhů Daylight resinu (Photocentric3d, 2016)

Viskozita₁ (při 25°C Brookfield spindle 3); **Tvrdość₂** (po dodatečném vytvrzení - ASTM D638); **Pevnost v tahu₃** (před dodatečným vytvrzení - ASTM D638) ; **Pevnost v tahu₄** (po dodatečném vytvrzení - ASTM D638) ; **Tahový modul₅** (po dodatečném vytvrzení - ASTM D638) ; **Délkové prodloužení₆** (ASTM D638) ; **Teplotní deformace₇** (ASTM D648)

2.3.6 UV RESIN – TECHNICKÁ DATA

Označení	Viskozita ₁	Tvrdość ₂	Pevnosť v tahu ₃	Pevnosť v tahu ₄	Smršťitelnost ₅	Délkové prodloužení ₆	Teplotní deformace ₇	Hustota
BR3D-UV-Hard-DLP	230 cPs	77 Shore D	15 MPa	42 MPa	-	8.7%	60°C	1.19 g/cm ³
BR3D-UV-Firm-DLP	560 cPs	65 Shore D	10 MPa	26 MPa	5.9%	14.9%	-	1.18 g/cm ³
BR3D-UV-FLEXI-DLP	200 cPs	80 Shore A	1,5 MPa	4,9 MPa	5.7%	75%	-	1.18 g/cm ³
BR3DGY01-DLP-UV-HTENSILE	510 cPs	80 Shore D	22 MPa	65 MPa	-	4%	63°C	1.16 g/cm ³
BR3DGY01-UV-TOUGH	470 cPs	60 Shore D	10 MPa	35 MPa	-	50%	-	1.14 g/cm ³
BR3D-UV-CAST-DLP	230 cPs	77 Shore D	15 MPa	42 MPa	-	8.7%	60°C	1.19 g/cm ³

Tabulka 3– Technické parametry jednotlivých druhů UV resinu (Photocentric3d, 2016)

Viskozita₁ (při 25°C Brookfield spindle 3); **Tvrdość₂** (po dodatečném vytvrzení - ASTM D638); **Pevnosť v tahu₃** (před dodatečným vytvrzení - ASTM D638) ; **Pevnosť v tahu₄** (po dodatečném vytvrzení - ASTM D638); **Smršťitelnost** (po dodatečném vytvrzení - ASTM D638) ; **Délkové prodloužení₆** (ASTM D638) ; **Teplotní deformace₇** (ASTM D648)

2.4 3D TISK V ATYPICKÝCH PODMÍNKÁCH

Teploty blíží se absolutní nule, podtlak specifický pro vakuum či samotné prostředí mikrogravitace jsou podmínky ve kterých se za normálních okolností člověk nepohybuje natož aby v nich běžně využíval 3D tisk tyto a i mnohé další lze tedy označit za přinejmenším atypické. V současné době jsou zkoumány možnosti 3D tisku v prostředí mikrogravitace a ve vakuu.

2.4.1 3D TISK – MIKROGRAVITACE

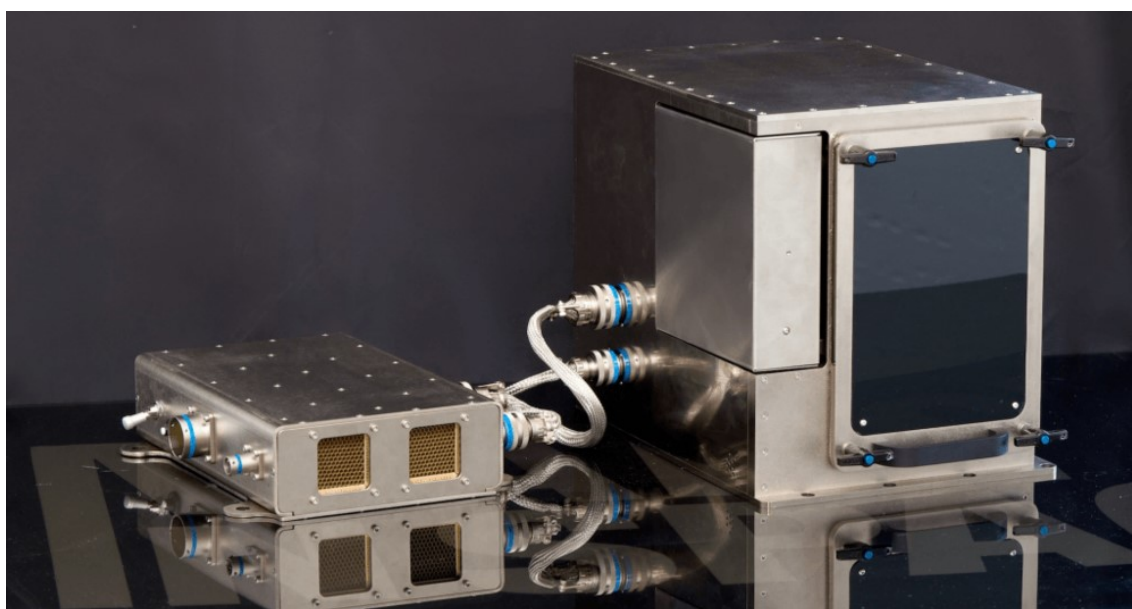
Mikrogravitací rozumíme prostředí malé nebo nepatrné gravitace, gravitační zrychlení působící v prostředí mikrogravitace je pouze zlomkové (v řádech 10^{-6}) s tím, které je pro lidstvo standardní na Zemi tedy „g“ ($g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$) (Vítek, 1982). Existují dvě klíčová hlediska, proč je 3D tisk v mikrogravitaci podstatný:

1. Čas
2. Finanční náklady

Hledisko času je vhodné vykládat jako schopnost uspokojit poptávku tzv. *on-demand* (tedy okamžité uspokojení potřeb s možností bezprostředního použití daného objektu). Budeme-li vycházet z jediného doposud publikovaného, byť stále běžícího výzkumu zaměřeného na 3D tisk v rámci ISS, kde 3D tisk zabezpečuje spolupráce NASA spolu se společností Made in space, je možné hledisku času dále charakterizovat jako snížení nezávislosti ISS na zásobovacích letech a dosažení alespoň částečně soběstačnosti v tomto ohledu bez nutnosti čekat na přílet kosmické lodi ze Země (NASA, 2016). Hledisko času úzce souvisí s druhým hlediskem finančními náklady. Zásobování ISS je nákladné a i když konkurenční prostředí mezi společnostmi ze soukromého sektoru napomáhá redukci ceny za jednotku vneseného nákladu na oběžnou dráhu ($< 10000 \text{ USD / Kg}$), stále se nejedná o zanedbatelnou částku. Materiál v podobě určené k dalšímu zpracování pomocí 3D tisku nabízí výrazně větší univerzalitu v porovnání s často jednoúčelovým objektem (SpaceX, 2016). Charakteristicky podobné potřeby uspokojení poptávky po objektech *on-demand* lze asociovat s úkryty nejen pro potřeby civilní ochrany, kdy zásobování úkrytu může být časově náročné, finančně nákladné, případně fyzicky nemožné (viz. kapitola 2.8 ÚKRYTÍ).

2.4.1.1 FDM 3D TISKÁRNA ISS

3D tiskárna sloužící k 3D tisku objektů pilotní části experimentu je derivátem 3D tiskáren na bázi technologie FDM. Praktické testy rámci ISS byly provedeny pouze s materiálem ABS a samotný proces 3D tisku byl ovládán na dálku. V rámci použitelnosti v uzavřeném prostoru byl kladen důraz na filtraci nanočástic a toxických plynů, čehož bylo docíleno hermeticky uzavíratelnou konstrukcí a mechanismem k separaci nežádoucích látek. K testování samotnému při vývoji sloužila simulace mikrogravitace pomocí hyperbolických letů, které tyto specifické podmínky mikrogravitace zvládnou na několik desítek sekund navodit. Parametry 3D tiskárny jsou uvedeny v tabulce číslo 4 (Madeinspace, 2015).



Obrázek 13 – 3D tiskárna umožňující 3D tisk v prostředí mikrogravitace (NASA, 2016)

Atribut	Hodnota
Maximální dimenze tisknutého objektu	140 mm x 100 mm x 100 mm
Tiskový materiál	ABS, Green PE, PEI / PC
Rozlišení tisku	0,1 mm – 0,44 mm
Výška jedné vrstvy	> 75 μ
Maximální tloušťka stěny	1 mm

Tabulka 4 – parametry tiskárny (Madeinspace, 2015)

2.4.2 3D TISK – VAKUUM

Vakuum - pro potřeby praxe 3D tisku ve vakuu je myšleno zejména vzduchoprázdno na úrovni prostředí typického pro okolí ISS (tedy úroveň nízké oběžné dráhy Země – výška kolem 400 km). V rámci experimentů, které probíhají prozatím na zemi se vakuem rozumí prostor, v němž je tlak plynu podstatně nižší než při normálním atmosférickém tlaku. Prostředí tohoto prostoru lze označit také jako hypobarické, jelikož v něm je podtlak (NASA, 2014). Vývoj 3D tisk ve vakuu je velmi důležitým krokem pro lidstvo umožňujícím změnit výrobní fundamenty ve vnějším prostoru obklopujícím ISS. Společnost Made in space, která spolu s NASA vyvíjí metodu pro potřeby tisku ve vakuu uvádí jako základní charakteristiky metody odolnost vůči podtlaku, extrémně nízkým teplotám a také silně ozařovanému prostředí (Madeinspace, 2015).



Obrázek 14 – vyvíjené zařízení pro 3D tisk ve vakuu (Madeinspace, 2015).

2.5 DIGITALIZACE FYZICKÉHO OBJEKTU

2.5.1 3D DIGITALIZACE FYZICKÉHO OBJEKTU

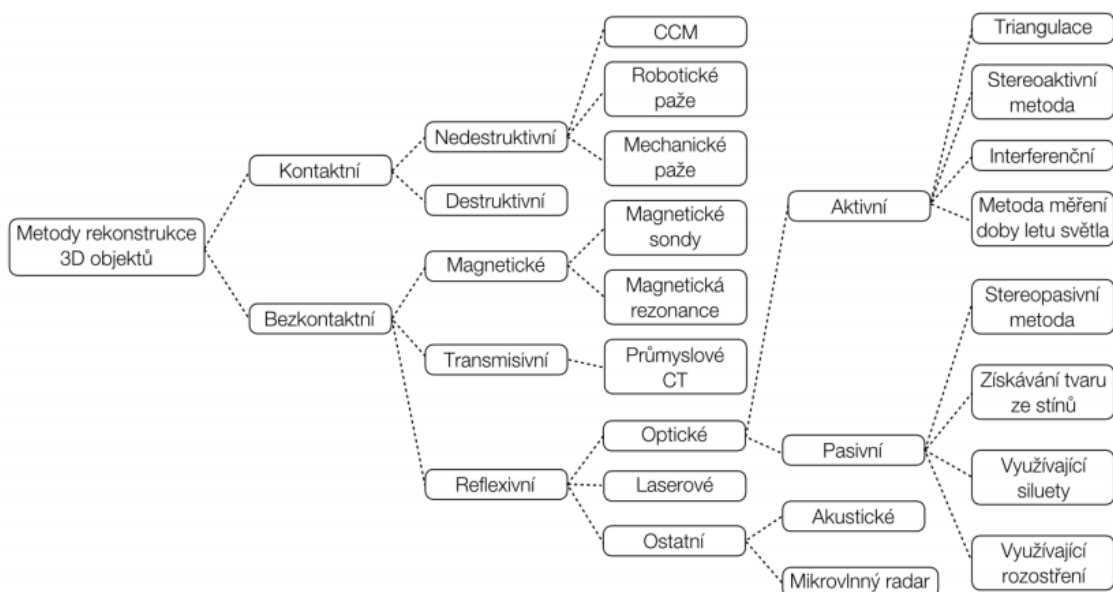
3D digitalizace je proces při kterém dochází k analyzování fyzického objektu a získávání informací o jeho trojdimenzionální geometrii pomocí velkého množství diskrétních bodů, které umožňují jeho následné sestavení v digitální 3D podobě. (Bernardini, 2002).

2.5.2 3D SKENER

Zařízení, které 3D digitalizaci po hardwarové stránce zajišťuje se označuje 3D skener. Velmi podobně jako v rámci 3D tisku je samotná výroba realizována 3D tiskárnou tak i 3D skener je možné označit za hlavního mediátora fáze processingu 3D digitalizace.

2.5.3 METODY 3D SKENOVÁNÍ

Členění 3D skenerů je vzhledem k jejich rozmachu zejména v posledních letech komplikovaná, modelů jsou již stovky. Nejobvyklejším prvním kritériem segmentace je použití bezdotykové či dotykové metody. Vzhledem k rychlosti skenování jsou bezdotykové skenery rozšířenější. Zatímco v medicíně převládají zejména skenery na bázi metody transmissivní CT (Výpočetní tomografie) a MR (Magnetická rezonance), pro účely 3D digitalizace a případný následný 3D tisk se jako vhodnější z ekonomického hlediska jeví metody reflexivní (optické / laserové). Kompletní přehled členění technologie 3D skenerů je na obrázku 15 (Čermák, 2015).



2.6 HYPERBARICKÉ PROSTŘEDÍ

Hyperbarické prostředí je takové prostředí, kde je tlak vyšší než normální atmosférický tlak (dále značený jen „ p_n “; hodnota $p_n = 101,32 \pm 2$ kPa) měřený na úrovni mořské hladiny při teplotě 15 C, tíhovém zrychlení $9,80665 \text{ ms}^{-2}$ a na úrovni 45° severní šířky. Z definice hyperbarického prostředí lze také dále odvodit, že prostředí s tlakem nižším, než je p_n možné označit jako hypobarické (Feynman, 2000).

Zatímco maximální možný hyperbarický tlak je teoreticky velmi složité konkrétně vyjádřit, hypobarické prostředí lze poměrně jasně dále členit na jednotlivá pásma vakua (stavu, kdy se v prostředí nenachází alespoň teoreticky ani jedna molekula) (Nist, 1994). Nástup hydrostatického tlaku vody v přirozených podmínkách vzhledem k nadmořské výšce je razantnější nežli v případě aerostatického tlaku vzduchu vlivem vyšší hustoty vody (HORÁK, 1981).

2.6.1 STAVOVÁ ROVNICE

Z hlediska plynů jsou pro širší kontext mimo Pascalova zákona důležité také tři základní stavové rovnice, které je možné shrnout do Stavová rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT$$

Kde p vyjadřuje tlak, V objem, n látkové množství, T teplotu a R plynovou konstantu s jednotkou $J.mol^{-1}.K^{-1}$.

K popisu chování reálného plynu jsou využívány stavové rovnice komplexnější zahrnující také mimo jiné vzájemné ovlivňování jednotlivých molekul plynu, ale pro potřeby této práce, respektive monitorování experimentu je zjednodušená rovnice dostačující (Kubatova, 2015).

2.7 UNDERWATER HABITAT / PODVODNÍ OBYDLÍ

Podvodní obydlí je specifickou strukturou umožňující lidem život pod vodní hladinou (v okolí vodního prostředí) po delší časový rámeček, přičemž člověk může vykonávat činnosti specifické pro biologický rytmus. Mezi takové lze zařadit pracování, spánek, stravování, potřeby osobní hygieny atd. To vše je zajištěno díky stabilnímu přesunu dýchacího média a netoxicitě prostředí (wikipedia, 2016). Tlak vnitřního plynného prostředí podvodního obydlí může být hyperbarický, ale existuje i možnost vnitřní atmosféru regulovat a vytvářet tlak na stejné či podobné úrovni jako p_n .

1. Pro první řešení podvodního obydlí je typická úroveň přetlaku shodující se s absolutním tlakem okolního vodního prostředí. V takovém případě dochází k saturaci tkání vdechovanými plyny na základě parciálního tlaku, které mohou podle úrovně saturace vést k nutnosti provádět posléze dekompresi. Při potápění, kdy jsou tkáně nasyceny na maximum a již více plyny při daném parciálním tlaku nenasytí, lze hovořit o tzv. saturačním potápění. Saturační potápění využívá fyzikálního limitu maximální možné saturace tkáně ve svůj prospěch tím, že prodlužuje možnost doby pobytu v daném hyperbarickém prostředí, aniž by se zároveň zvyšovala doba potřebné dekomprese (Miller, 1984; Beyerstein, 2006).
2. Druhé řešení podvodního obydlí s tlakem na stejné či podobné úrovni p_n umožňuje (v závislosti na druhu přístupu do obydlí) nutnost dekomprese zcela odstranit případně značně omezit délku jejího trvání. Pokud není možný „suchý“ přístup do takového obydlí a je-li umístěn dostatečně hluboko aby docházelo k saturaci tkání nad přijatelnou mez je naopak možné, že bude potřeba provádět dekompresi před vstupem do prostředí obydlí k čemuž pak slouží mimo jiné přechodový prostor. Tento prostor se hermeticky uzavře a následně přetlakuje či naopak tlak zreguluje a úroveň prostředí do kterého je žádoucí v daný okamžik vstoupit. Potřeba provádět dekompresi v přechodové komoře tedy přechod do prostoru s podtlakem prodlouží o dobu potřebnou k vysycení tkání (Miller, 1984).

3. Třetí možností řešení z hlediska tlaku podvodního obydlí je vzájemná kombinace bodů: 1. a 2. díky níž je zvýšena míra všestranného využití.



Obrázek 16- NASA projekt Neemo (NASA, 2016)

2.8 ÚKRYTÍ

Úkrytí je jedním z fundamentálních úkolů *civilní ochrany* o jejíž plnění zastřešuje *ochrana obyvatelstva viz. „ochranou obyvatelstva plnění úkolů civilní ochrany, zejména varování, evakuace, ukrytí a nouzové přežití obyvatelstva a další opatření k zabezpečení ochrany jeho života, zdraví a majetku.“* (Zákon č. 239/2000 Sb.) Ukrytím se rozumí využití úkrytů CO (civilní ochrany) a jiných vhodných prostorů, které se společně se stavebními a jinými doplňkovými úpravami přizpůsobují k ochraně obyvatelstva. Ukrytí obyvatelstva se při mimořádných událostech zajišťuje:

1. V improvizovaných úkrytech
2. Ve stálých úkrytech civilní ochrany



Obrázek 17 Úkryt civilní ochrany Parukářka (Jambor , 2008)

2.8.1 IMPROVIZOVANÉ ÚKRYTY

Improvizované úkryty jsou upravené podzemní nebo i nadzemní prostory ve stavbách. Improvizovaný úkryt je předem vybraný optimálně vyhovující prostor ve vhodných částech bytů, obytných domů, provozních a výrobních objektů, který bude upravován fyzickými a právními osobami pro jejich ochranu a pro ochranu jejich zaměstnanců před účinky mimořádných událostí s využitím vlastních materiálních a finančních zdrojů (Vyhláška č. 380/2002 Sb.; HZSČŘ, 2017) .

2.8.2 STÁLÉ ÚKRYTY CIVILNÍ OCHRANY

Stálé úkryty civilní ochrany jsou ochranné stavby, které se budují investičním způsobem v době míru, převážně jako dvouúčelově využívané stavby. Stálé úkryty se dělí na:

1. Stálé tlakově odolné úkryty se využívají k ochraně obyvatelstva proti účinkům zbraní hromadného ničení v případě stavu ohrožení státu a válečného stavu (Vyhláška č. 380/2002 Sb.)
2. Stálé tlakově neodolné úkryty se využívají k ochraně obyvatelstva proti účinkům světelného a tepelného záření, pronikavé radiaci, kontaminaci radioaktivním prachem a částečně proti tlakovým účinkům zbraní hromadného ničení v případě stavu ohrožení státu a válečného stavu (Vyhláška č. 380/2002 Sb.)
3. Ochranné systémy podzemních dopravních staveb se využívají k ochraně obyvatelstva při stavech podle odstavce 5 a při mimořádných událostech (Vyhláška č. 380/2002 Sb.)

2.8.3 ÚKRYT S KONTROLOVANÝM PŘETLAKEM (CBRN OCHRANA)

CBRN je zkratka označující hrozby:

- Chemické
- Biologické
- Radiologické
- Jaderné

Ukryt s kontrolovaným přetlakem souží jako ochrana před CBRN hrozbami. Ochrana je zajištěna:

- Vzduchotěsným „bezpečným prostorem“ (hermeticky uzavíratelným od zbytku kontaminovaných prostor)
- Filtračním systémem

2.8.3.1 FILTRAČNÍ SYSTÉM

Filtrační systém – filtrační jednotka nasává vzduch mimo hermeticky oddělený bezpečný prostor skrze vstupní ventil a filtruje jej soustavou několika dílčích filtrů, které mají za úkol odfiltrovat škodlivé toxiny, ale i částice přirozeně se ve vzduchu vyskytující jako jsou prach nebo pyl. Složený filtr s účinností filtrace až 99.97 % částic o velikosti $> 0,3 \mu\text{m}$ se skládá běžně z pěti následujících filtrů:

1. Filtr zachytávající hrubé nečistoty
2. Předfiltr
3. HEPA filtr
4. Filtr absorbující plynné molekuly
5. Jemný uhlíkový filtr

Přefiltrovaný vzduch je dále vháněn do hermeticky odděleného bezpečného prostoru a to tak aby byl vytvořen mírný přetlak (v řádu jednotek až desítek kPa). Tento přetlak zabraňuje vniknutí nejen kontaminovaných částic dovnitř. Úroveň přetlaku je řízena přetlakovým ventilem. Tento princip ochrany využívá také Armáda ČR (ČOS 151006, 2010; Makel, 2013; CBRN defense, 2014)

3 CÍLE PRÁCE

3.1 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je zejména získat dostatečné poznatky na základě kterých bude možné určit smysluplnost dalšího zkoumání této problematiky. Prokázat potenciální možnost využití 3D tisku a případné reprodukce objektů i za pomoci digitalizace v hyperbarickém prostředí coby premisu pro využití 3D tisku v úkrytu a jiném uzavřeném objektu obdobné funkce.

3.2 ÚKOLY PRÁCE

1. V teoretické části pomocí rešerše získat hlubší poznatky k realizaci praktické části se zaměřením na:
 - 3D tisk obecně; historie; technologie 3D tisku; Tiskový materiál a jeho vlastnosti; 3D tisk v atypických podmínkách
 - Hyperbarické prostředí (podvodní obydlí; úkryty s kontrolovaným přetlakem)
 - Základy digitalizace 3D objektů
2. Provést výběr vhodné tiskárny a tiskového materiálu. Provést úpravy nutné pro provoz z baterie, kalibraci tiskárny a případné úpravy pro odstranění překážek technického charakteru, které by bránily přistoupení k experimentální části práce.
3. Navrhnout vhodné dílčí části experimentů pro testování hypotézy H_B a test pro analýzu pomocí třídění vědecké otázky V_A
4. Pomocí digitalizace a modelování vytvořit vlastní bustu pro tvorbu masky a vymodelovat základní masku spolu s nástrojem na zjišťování funkčnosti objektů.
5. Materiálně zabezpečit průběh experimentu včetně hyperbarického prostředí.
6. Vyhodnotit výsledky vhodně je konfrontovat a vyvodit vypovídající závěr.

3.3 VĚDECKÉ OTÁZKY

Na základě praktických poznatků z problematiky 3D tisku a teoretických východisek v počáteční fázi této práce byly vyvozeny následující vědecké otázky:

- V_{A1} Je běžná finančně dostupná 3D tiskárna schopná tisku v hyperbarickém prostředí s minimem modifikací?
- V_{A2} Pakliže bude tiskárna schopna tisku v hyperbarickém prostředí budou testované vytisknuté objekty schopny plnit svůj účel?
- V_B Bude výrazný rozdíl v hmotnosti mezi objekty vytištěnými za normálního atmosférického tlaku a za tlaku hyperbarického?

3.4 HYPOTÉZY

Z vědecké otázky V_B vyplynula následující hypotéza:

H_B : Mezi objekty vytisknutými při atmosférickém tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ a objekty vytisknutými při absolutním tlaku $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ bude v hmotnosti rozdíl.

Limit statistické významnosti pro H_B byl stanoven na úrovni $\alpha = 0,05$

Za věcně významný je považován rozdíl v hmotnosti menší nebo roven 5 % v porovnání s objekty vytisknutými za atmosférického tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$.

4 METODIKA PRÁCE

4.1 VÝZKUMNÝ SOUBOR

Fyzické objekty tvořící nosnou část samotného výzkumného souboru byly získány zejména za pomoci 3D tisku postupem specifikovaným kapitole „4.4 STANDARDIZACE PORECESU 3D TISKU A 3D SKENOVÁNÍ VZORKU PRO POTŘEBY EXPERIMENTU“. Prekurzory pro vznik fyzických objektů jsou tvořeny soubory ve formátu .stl obsahující jednotlivé 3D modely. Specifikace 3D modelů jsou obsaženy v kapitole „4.1.1 SEZNAM 3D MODELŮ“.

4.1.1 SEZNAM 3D MODELŮ A OBJEKTŮ

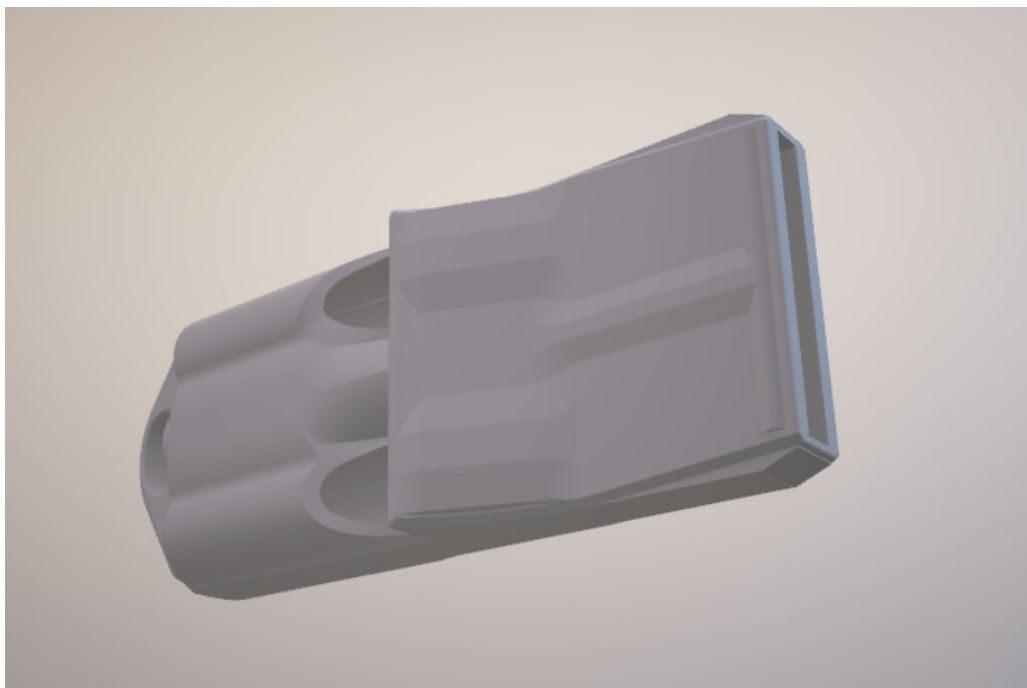
Seznam modelů je členěn na 3D modely pro testování hypotézy H_B a hypotézy $H_{B'}$. Každý 3D model je charakterizován:

- maximálními rozměry v osách X ,Y ,Z (délka , šířka, výška) s jednotkou mm
- objemem s jednotkou cm^3
- povrchem s jednotkou cm^2
- počtem polygonů

3D modely byly vybrány s důrazem na možnost tisku bez nutnosti využívat podporných struktur a dále s ohledem na přirozenou přeměnou elektrické energie vytvářející nežádoucí odpadní teplo v rámci uzavřeného hyperbarického prostředí, z čehož vyplynulo omezení maximální výšky 3D modelu 50 mm. Výjimku tohoto omezení jsou pouze 3D modely s označením HB9 a HB10, které představují samostatné dílčí úkoly této práce. Po určení měřítka 3D modelu byl rozhodující limit maximálního možného objemu, který je tiskárna schopna fyzicky vytisknout a sice kvádr o součinu hran 120 mm x 68 mm x 200 mm. V případě, kdy se 3D model nevešel do tohoto limitu s defaultními rozměry ve kterých byl uložen, bylo přistoupeno k dekrementaci o kroku odpovídajícímu 50 % jeho defaultního měřítka.

4.1.1.1 3D MODEL - VĚDECKÉ OTÁZKY V_A

3D model „malá pištala“ (Hughes, 2015) dále značený „ V_A “ – je blíže specifikován v kapitole „4.6.1 3D MODEL V_A “. a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.2 OBJEKTY – VĚDECKÉ OTÁZKY V_A “. Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.



Obrázek 18– 3D model V_A (vlastní archiv, 2017)

Délka	55.41 mm
Šířka	22.23 mm
Výška	8.93 mm
Objem	4.04 cm ³
Povrch	60.25 cm ²
Počet polygonů	41608

Tabulka 5 – specifikace 3D modelu V_A

4.1.1.2 OBJEKTY – VĚDECKÉ OTÁZKY V_A

Níže uvedená tabulka číslo 6 obsahuje označení fyzických objektů vycházejících z 3D modelu „VA1“. Levý sloupec obsahuje označení výchozího 3D modelu a pravý sloupec označení fyzického objektu. Fyzické objekty jsou rozděleny do dvou skupin dle koncovek. „C“ značí objekty vytisknuté pomocí materiálu „BR3DCL01-UV-HARD“ a „B“ objekty vytisknuté z materiálu „BR3DBLK01-DL-FIRM“ (materiály vychází ze standardizace 3D tisku uvedeném v kapitole „4.4.2.2 PROCESSING“; jednotlivé vlastnosti materiálu jsou popisovány v kapitole „2.3.5 DAYLIGHT RESIN – TECHNICKÁ DATA“ a „2.3.6 UV RESIN – TECHNICKÁ DATA“). Celkem se jedná o dvě skupiny s „ $n_1 = 10$ “ a „ $n_2 = 10$ “.

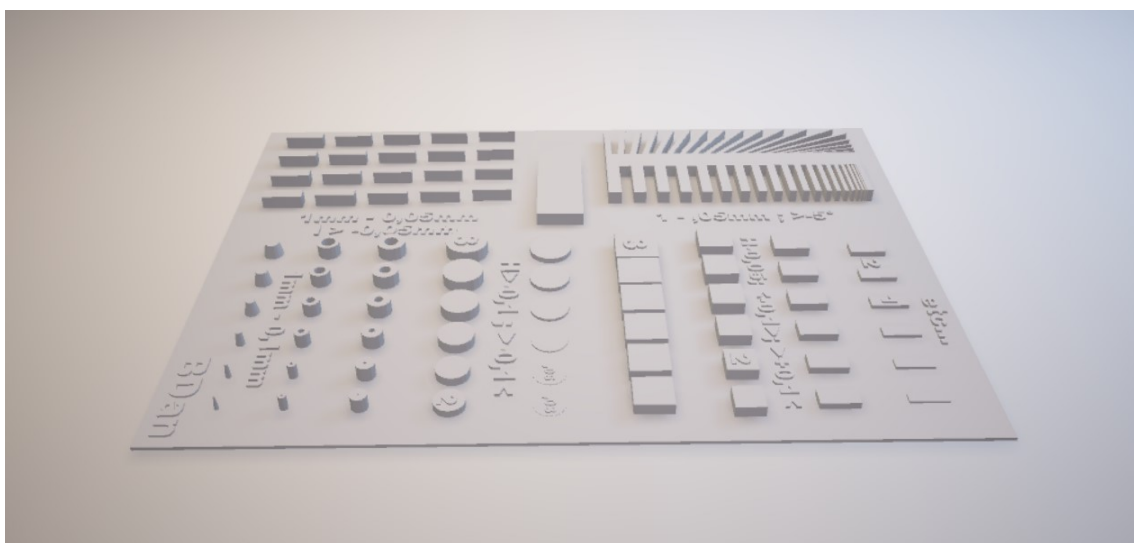
Označení 3D modelu	Označení fyzického Objektu
VA1	VA1-1-B
	VA1-2-B
	VA1-3-B
	VA1-4-B
	VA1-5-B
	VA1-6-B
	VA1-7-B
	VA1-8-B
	VA1-9-B
	VA1-10-B
	VA1-1-C
	VA1-2-C
	VA1-3-C
	VA1-4-C
	VA1-5-C
	VA1-6-C
	VA1-7-C
	VA1-8-C
	VA1-9-C
	VA1-10-C

Tabulka 6 – značení fyzických objektů – vědecké otázky V_A vycházejících z 3D modelu V_{A1}

4.1.1.3 3D MODELÝ - HYPOTÉZA H_B

3D modely pro produkci fyzických objektů k testování hypotézy H_B (kde $n = 10$) se skládá z následujících 3D modelů:

1. 3D model „kalibrační matice“ (Brastaviceanu; 2014) dále značený „HB1“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.

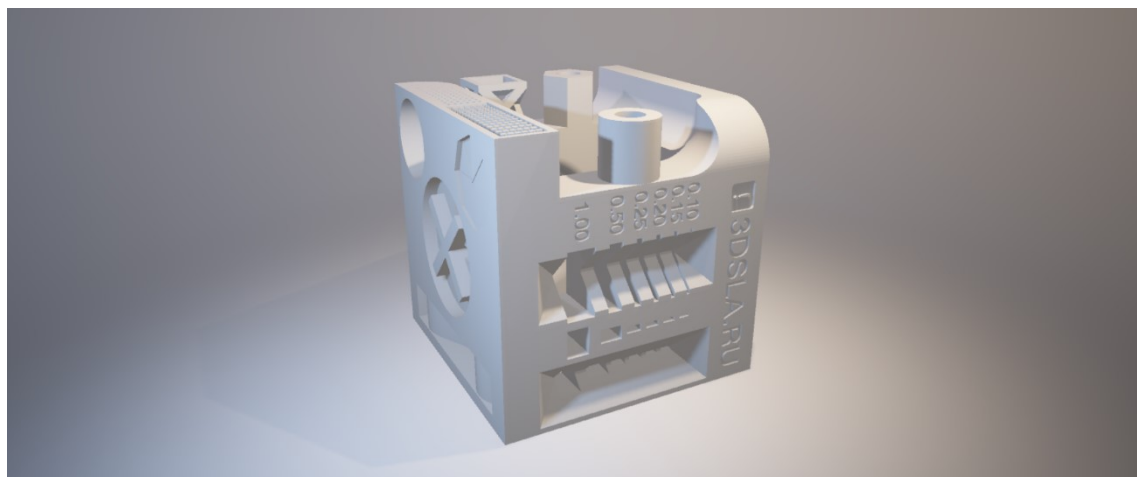


Obrázek 19 – 3D model HB1 (vlastní archiv, 2017)

Délka	51.00 mm
Šířka	38.00 mm
Výška	1.4 mm
Objem	0.75 cm ³
Povrch	56.77 cm ²
Počet polygonů	14804

Tabulka 7 – specifikace 3D modelu HB1

2. 3D model „testovací SLA model“ (Vlasov; 2015) dále značený „HB2“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.

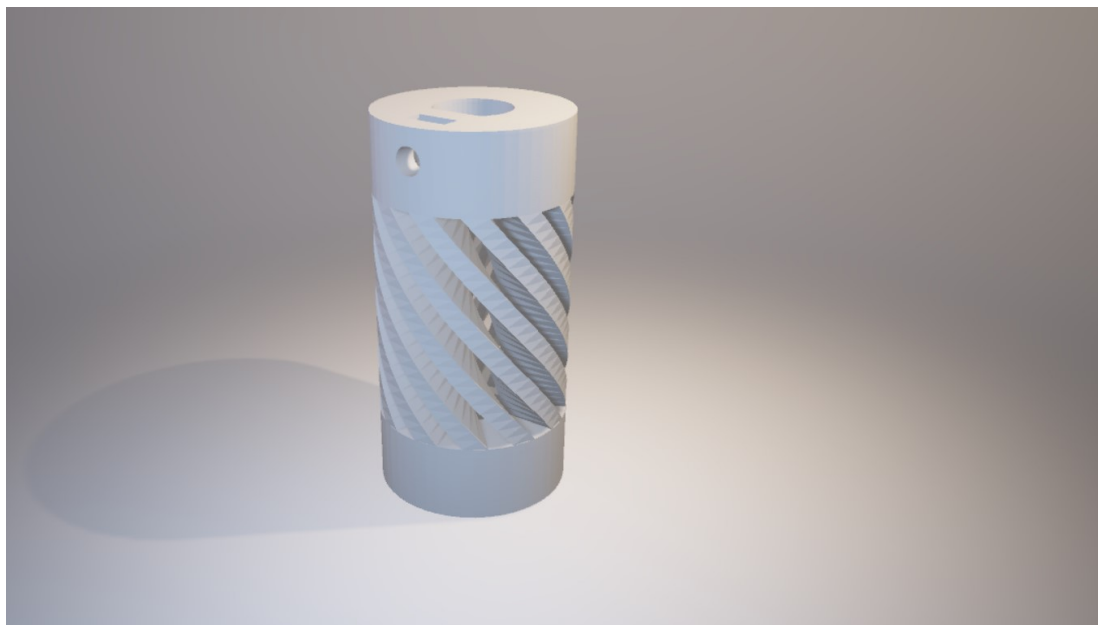


Obrázek 20– 3D model HB2 (vlastní archiv, 2017)

Délka	10.00 mm
Šířka	10.00 mm
Výška	10.00 mm
Objem	0.46 cm ³
Povrch	10.58 cm ²
Počet polygonů	221032

Tabulka 8 – specifikace 3D modelu HB2

3. 3D model „pružná spojka“ (Alici; 2013) dále značený „HB3“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.

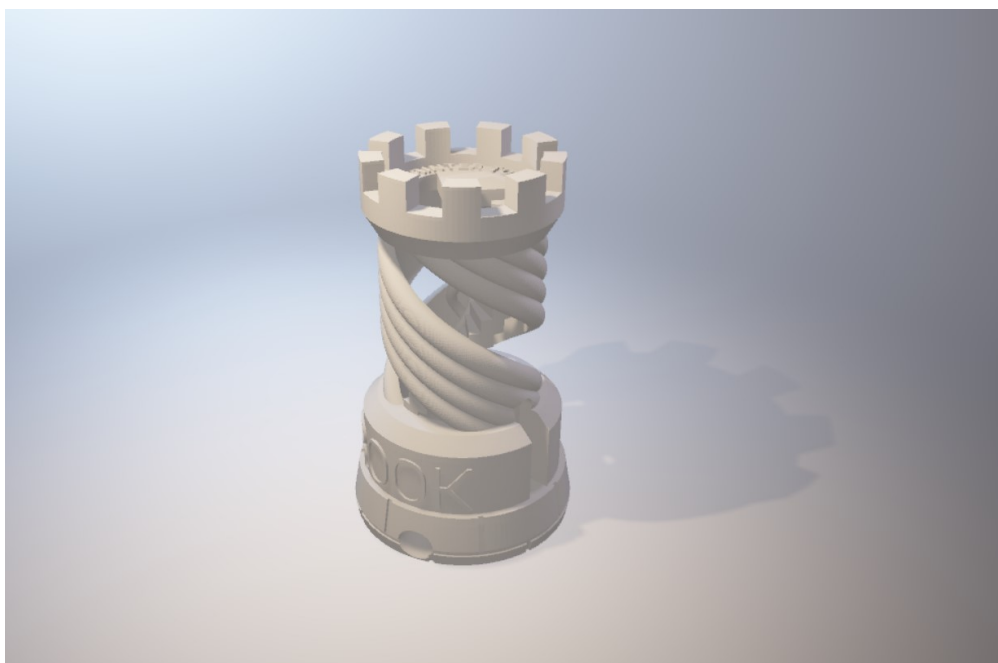


Obrázek 21– 3D model HB3 (vlastní archiv, 2017)

Délka	25.00 mm
Šířka	25.00 mm
Výška	50.00 mm
Objem	14.50 cm ³
Povrch	120.11 cm ²
Počet polygonů	3884

Tabulka 9 – specifikace 3D modelu HB3

4. 3D model „Rook – testovací věž“ (Make, 2014) dále značený „HB4“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.

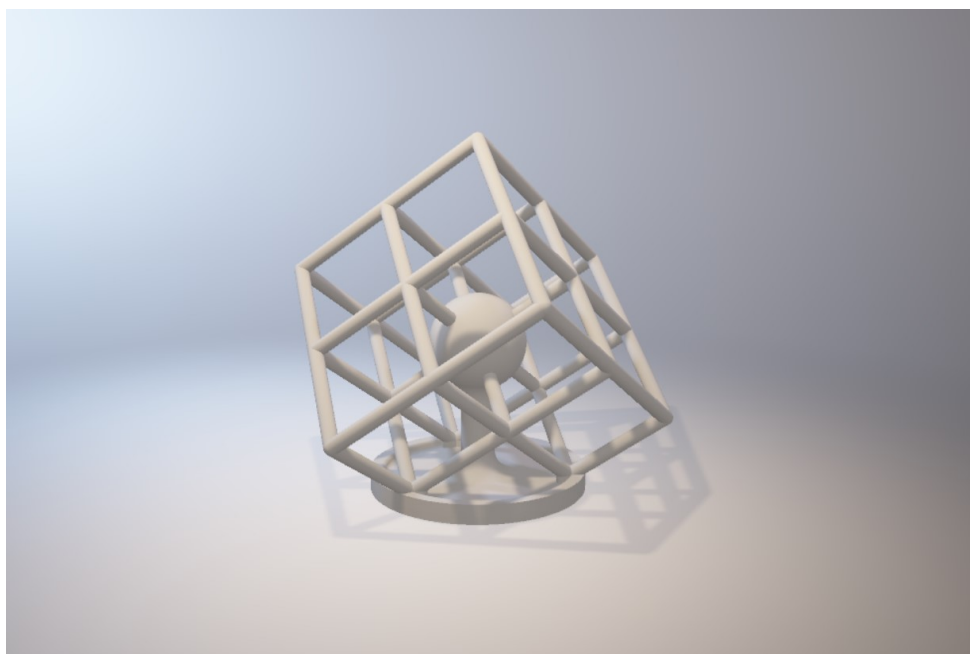


Obrázek 22– 3D model HB4 (vlastní archiv, 2017)

Délka	14.33 mm
Šířka	14.33 mm
Výška	24.00 mm
Objem	1.30 cm ³
Povrch	19.5 cm ²
Počet polygonů	219436

Tabulka 10– specifikace 3D modelu HB4

5. 3D model „*Krychle*“ (Armstrong, 2017) dále značený „*HB5*“ – a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.



Obrázek 23– 3D model HB5 (vlastní archiv, 2017)

Délka	21.21 mm
Šířka	21.20 mm
Výška	20.00 mm
Objem	0.32 cm ³
Povrch	12.06 cm ²
Počet polygonů	126058

Tabulka 11– specifikace 3D modelu HB5

6. 3D model „flexibilní chobotnice“ (Heston, 2013) dále značený „HB6“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.

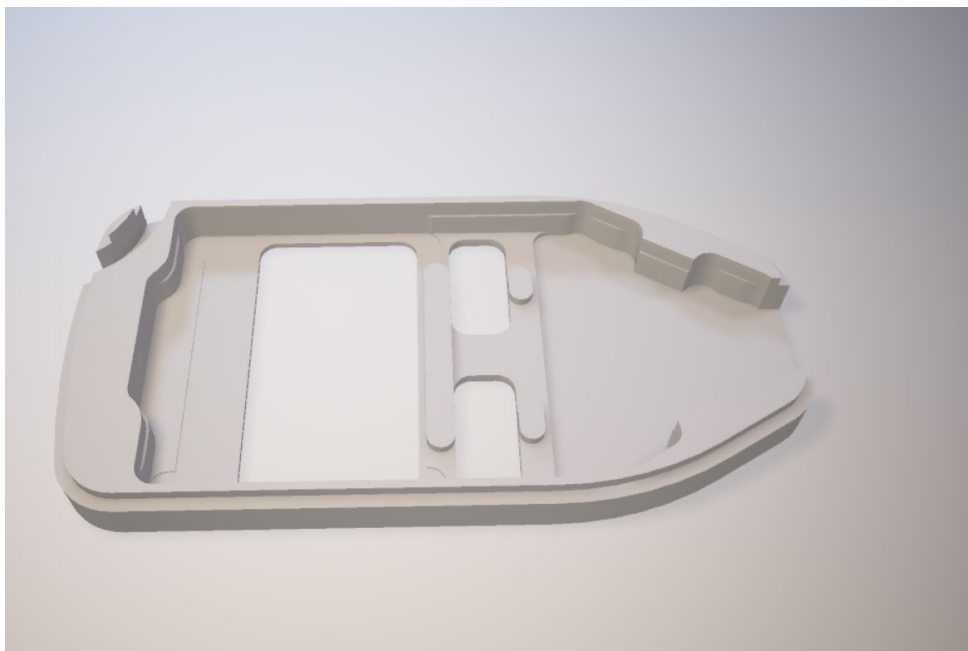


Obrázek 24– 3D model HB6 (vlastní archiv, 2017)

Délka	46.47 mm
Šířka	46.71 mm
Výška	12.69 mm
Objem	2.62 cm ³
Povrch	22.08 cm ²
Počet polygonů	6490

Tabulka 12– specifikace 3D modelu HB6

7. 3D model „Kryt zařízení *Trezor*“ (Lízner, 2016) dále značený „*HB7*“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.



Obrázek 25– 3D model HB7 (vlastní archiv, 2017)

Délka	30.00 mm
Šířka	58.93 mm
Výška	5.00 mm
Objem	2.49 cm ³
Povrch	38.24 cm ²
Počet polygonů	2934

Tabulka 13– specifikace 3D modelu HB7

8. 3D model „Klíč“ (NASA MSFC a MADE IN SPACE, 2015) dále značený „HB8“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.

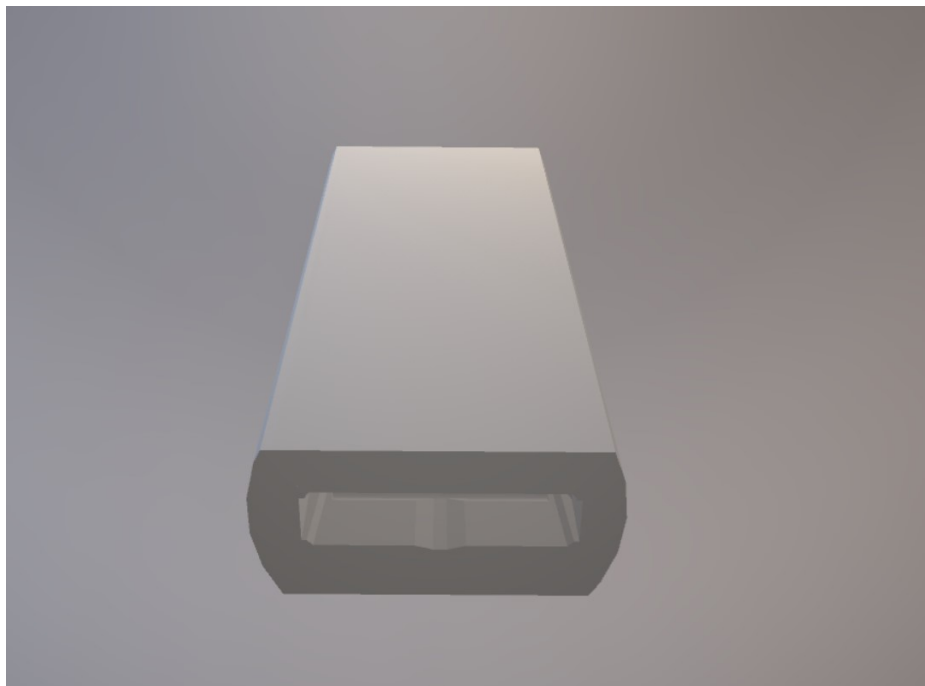


Obrázek 26– 3D model HB8 (vlastní archiv, 2017)

Délka	33.13 mm
Šířka	114.23 mm
Výška	26.00 mm
Objem	34.81 cm ³
Povrch	124.73 cm ²
Počet polygonů	14564

Tabulka 14– specifikace 3D modelu HB8

9. 3D model „HB9 – Redukce na objekty vzniklé na základě 3D modelu VAI“ (vlastní archiv, 2017) dále značený „HB9“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2.

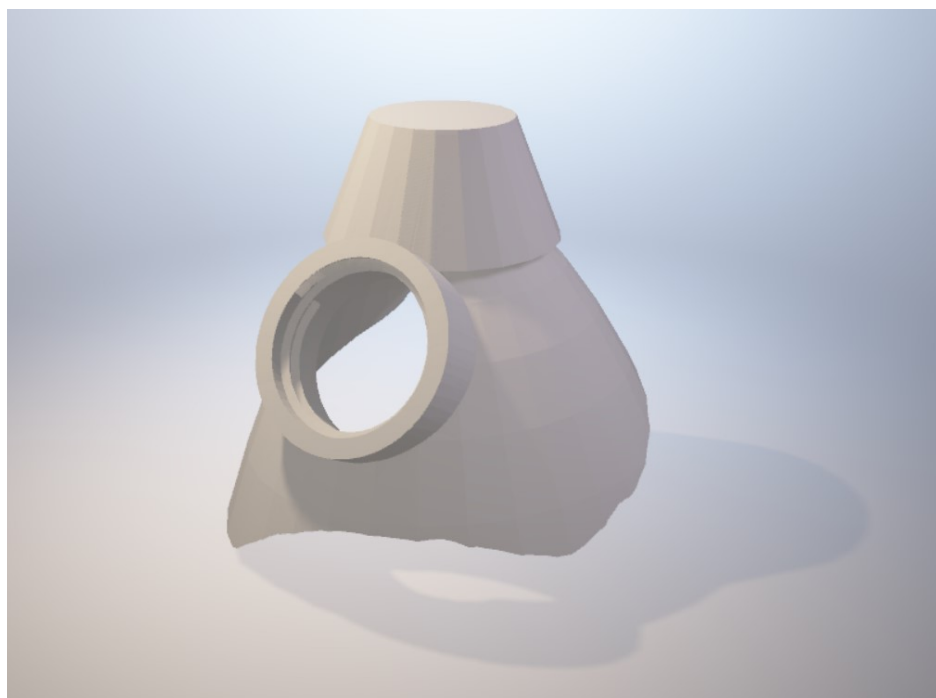


Obrázek 27– 3D model HB9 (vlastní archiv, 2017)

Délka	29.90 mm
Šířka	14.37 mm
Výška	70.00 mm
Objem	25.95 cm ³
Povrch	85.52 cm ²
Počet polygonů	30386

Tabulka 15– specifikace 3D modelu HB9

10. 3D model „*Improvizovaná Ochranná maska*“ (vlastní archiv, 2017) dále značený „*HB10*“ a značení fyzických objektů odvozených od tohoto 3D modelu jsou předmětem kapitoly „*4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B* “ Odkaz ke stažení původního souboru je k dispozici v příloze číslo 2. Postup výroby HB10 je specifikován v kapitole „*4.4 STANDARDIZACE PORECESU 3D TISKU A 3D SKENOVÁNÍ VZORKU PRO POTŘEBY EXPERIMENTU*“.



Obrázek 28– 3D model HB10 – bez podpor (vlastní archiv, 2017)

Délka	66.60 mm
Šířka	74.87 mm
Výška	75.91 mm
Objem	54.16 cm ³
Povrch	495.91 cm ²
Počet polygonů	10420

Tabulka 16– specifikace 3D modelu HB10 s podporami

4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B

Níže uvedená tabulka číslo 17 obsahuje označení fyzických objektů vycházejících z jednotlivých 3D modelů. Levý sloupec obsahuje označení výchozího 3D modelu (viz. kategorie „4.1.1.3 3D MODELÝ - HYPOTÉZA H_B “) a pravý sloupec označení fyzického objektu. Fyzické objekty jsou rozděleny do dvou skupin dle koncovek. „A“ značí objekty vytisknuté za atmosférického tlaku (viz. hypotéza „ H_B “) a „H“ objekty vytisknuté z tlaku hyperbarického (viz. hypotéza „ H_B “). Použitý tiskový materiál byl u všech objektů „BR3DBLK01-DL-FIRM“ (materiály vychází ze standardizace 3D tisku uvedeném v kapitole „4.4.2.2 PROCESSING“; jednotlivé vlastnosti materiálu jsou popisovány v kapitole „2.3.5 DAYLIGHT RESIN – TECHNICKÁ DATA“). Velikost vzorku $n = 10$.

Označení 3D modelu	Označení fyzického objektu
HB1	HB1-1-B-A
	HB1-1-B-H
HB2	HB2-1-B-A
	HB2-1-B-H
HB3	HB3-1-B-A
	HB3-1-B-H
HB4	HB4-1-B-A
	HB4-1-B-H
HB5	HB5-1-B-A
	HB5-1-B-H
HB6	HB6-1-B-A
	HB6-1-B-H
HB7	HB7-1-B-A
	HB7-1-B-H
HB8	HB8-1-B-A
	HB8-1-B-H
HB9	HB9-1-B-A
	HB9-1-B-H
HB10	HB10-1-B-A
	HB10-1-B-H

Tabulka 17 – značení objektů pro potřeby hypotézy H_B , modely HB1-HB10 a z nich vycházející fyzické objekty

4.2 SBĚR DAT

Data pro potřeby třídění V_A byla získaná dle výsledku Testu funkčnosti popsaném v kapitole 4.7 TEST FUNKČNOSTI, jehož výstupem bylo hodnocení principu binárních dat tedy „1“ a „0“.

Data o hmotnosti jednotlivých objektů pro potřeby verifikace H_B byla získána za pomoci cejchované váhy splňující § 37 Zákona č. 539/1992 Sb. S označením TSCALE NHB600M parametry viz. Tabulka 18 . Pro zpracování náhodné chyby bylo provedeno 5 měření.

Označení	TSCALE NHB600M
Váživost	600 g
Dílek skutečný (d)	0,01 g
Dílek ověřitelný (e)	0,1 g
Průměr vážící plochy	120 mm
Napájení:	AC 230V

Tabulka 18 – parametry váhy (Lesák, 2017)

Všechny objekty byly získány dle jednotného postupu uvedeného v kapitole 4.5 STANDARDIZACE PORECESU 3D TISKU A 3D SKENOVÁNÍ VZORKU PRO POTŘEBY EXPERIMENTU, kde konečným krokem bylo vždy dodatečné vytvrzení pomocí elektromagnetického záření o vlnové délce 405 nm.

Sběr dat sloužících k monitorování hyperbarického prostředí včetně využitého vybavení je popsán v kapitole 4.6 PROSTŘEDÍ PRO POTŘEBY EXPERIMENTU.

Jednotlivé objekty byly vyrobeny v rozmezí 9. 6. 2017 – 17 . 7. 2017 a sběr dat proběhl v případě objektů:

- V_A - 17. 7. 2017
- H_B - vždy do 30minut po dokončení celého procesu

4.3 ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA DAT

Statistické zpracování dat V_A a H_B probíhalo v tabulkovém editoru EXCEL, jenž patří do kancelářského balíku Microsoft Office 2016 ve verzi 16.0.8229.2086.

4.3.1 VĚDECKÉ OTÁZKY V_A

Výsledky testu funkčnosti byly zpracovány pomocí statistické metody třídění za pomoci srovnávacích grafů a tabulek. Data byla vyjádřena relativně (percentuálně) i absolutně (Hendl, 2015).

4.3.2 HYPOTÉZA H_B

Data naměřené hmotnosti byla zpracována pomocí statistických metod popisných a metody inferenční (Hendl, 2015).

4.3.2.1 METODY POPISNÉ

Vzhledem k náhodné chybě měření, bylo měření opakováno celkem dvacetkrát a následovně vyjádřena střední hodnota jakožto aritmetický průměr. Pro kontext aritmetického průměru je důležitý míra variability vyjádřená v tomto případě směrodatnou odchylkou, respektive variačním koeficientem.

- **Aritmetický průměr - \bar{x}**

Aritmetický průměr značený \bar{x} je definován jako funkce všech hodnot dané proměnné, kdy součet všech hodnot náhodné proměnné x_i dělíme jejich počtem. Pro odhad teoretické skutečné střední hodnoty základního souboru se používá aritmetický průměr \bar{x} , který lze empiricky vypočítat pro výběrový soubor, s použitím konečného počtu n jedinců náhodně vybraných ze základního souboru (Bed'áňová, 2007):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- **Směrodatná odchylka - s**

Směrodatná odchylka značená s je definována jako druhá odmocnina z rozptylu. Směrodatná odchylka má stejné měrné jednotky jako sledovaná číselná proměnná ve statistickém souboru (odmocněním rozptylu se čtverce měrných jednotek číselných proměnných v rozptylech převedou zpět do lineárního tvaru). Výpočet výběrové směrodatné odchylky pro výběrový soubor je (Beďáňová, 2007):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

- **Variační koeficient -V**

Variační koeficient značený V je relativní mírou variability a tedy není ovlivněn absolutními hodnotami sledovaného statistického znaku jako směrodatná odchylka. Při vyjádření v procentech, variační koeficient udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru. Výpočet pro výběrový soubor je následující (Beďáňová, 2007):

$$V = \frac{s * 100}{\bar{x}} [\%]$$

4.3.2.2 *METODA INFERENČNÍ*

Nepárový t-test je testem, kdy porovnáváme data, která tvoří dva nezávislé výběry, tzn. že pocházejí ze dvou různých skupin. Hladina významnosti $p = 0,05$. Při testování hypotéz slouží k určení statistické významnosti. (Beďáňová, 2007)

4.4 STANDARDIZACE PROCESU 3D TISKU A 3D SKENOVÁNÍ VZORKU PRO POTŘEBY EXPERIMENTU

Vzhledem k tomu, že proces 3D skenování i 3D tisku pokaždé přinese trošku odlišné výsledky i v prostředí s normálním atmosférickým tlakem a tvoří spíš velmi podobné originály než-li naprosté kopie, byl pro tuto potřebu sestaven následující proces, aplikovaný k získání všech objektů. Demonstrován bude na nejsložitějším vzorku (co se samotné realizace týče) a sice 3D modelu improvizované masky dále s označením *HB10*. Procesu 3D skenování tedy 3D digitalizace za pomoci 3D skeneru bylo využito pouze u 3D modelu HB10. Zbytek 3D modelů byl vytvořen v některém z programů pro modelování. (Příloha 1 obsahuje kompletní ilustraci vybavení a postupů formou obr.)

4.4.1 3D SKENOVÁNÍ

4.4.1.1 PREPROCESSING

V této fázi bylo nutné zajistit stabilitu objektu, zkontrolovat zda objekt obsahuje transparentní či lesklé plochy a případně povrch těchto ploch pokryt suchým šamponem nebo jiným přípravkem, který objekt samotný nepoškodí, ale zároveň nežádoucí odlesky / transparentci eliminuje zmatněním těchto ploch.

4.4.1.2 PROCESSING

Digitalizace samotná byla provedena pomocí ručního 3D skeneru „*XYZprinting 3D scanner*“ specifikace jsou uvedeny v tabulce 19. (Byť se jedná o opravdu základní model 3D skeneru nabízí dostatečnou kvalitu pro účely této práce a vysokou rychlost snímání.) Objekt byl nasnímán dle instrukcí programu v módu „*HEAD*“ ze vzdálenosti cca 20 cm pohybem podle pomyslné orbity, dokud nebylo snímání programem zastaveno pro získání požadovaného množství dat. Data ze skeneru byla přenášena do PC s Windows 10 na kterém běžel program „*3D Sense*“ verze 3.0.213 (viz. ilustrativní obr. 29.) Výstupním souborem byl formát .obj.

Rozlišení skeneru	1.5 mm
Provozní rozsah snímání	100 mm – 700 mm
Minimální dimenze skenovaného objektu	50 mm x 50 mm x 50 mm
rozhraní	USB 3.0
hmotnost	235 g
Rozlišení / frekvence	640 x 480 / 30FPS
Senzor	Intel RealSense F200
Technologie	Strukturované světlo
Výstupní formáty	.stl .obj

Tabulka 19 – specifikace skeneru (vlastní archiv)



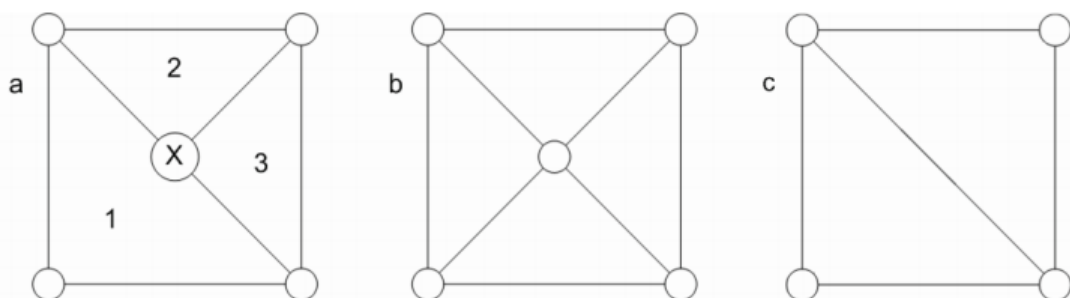
Obrázek 29 – demonstrativní proces 3D skenování v prostředí programu 3D Sense (vlastní archiv)

4.4.1.3 POST PROCESSING

Během této fáze byl objekt zbaven artefaktů a nežádoucích částí objektu, dále opraven a vyexportován do souboru formátu .stl. (obr. 30) Všechny tyto operace proběhly v programu „MashLab“. Opravou se rozumí kontrola uzavřenosti 3D modelu, respektive kontrola zda jsou vždy jednotlivé vrcholy trojúhelníků v kontaktu s ostatními viz. obr. 31.



Obrázek 30 – Výstupní opravený .STL soubor z programu MashLab (vlastní archiv)



Obrázek 31 – Pravidlo „vrchol k vrcholu“ - Aby bylo pravidlo „vrchol-k-vrcholu“ splněno, trojúhelník 1 by měl být rozdělen do dvou trojúhelníků, jak je znázorněno na obrázku „b“, nebo by se měly trojúhelníky 2 a 3 spojit jako na obrázku „c“ (Dybała, 2008)

4.4.2 3D TISK

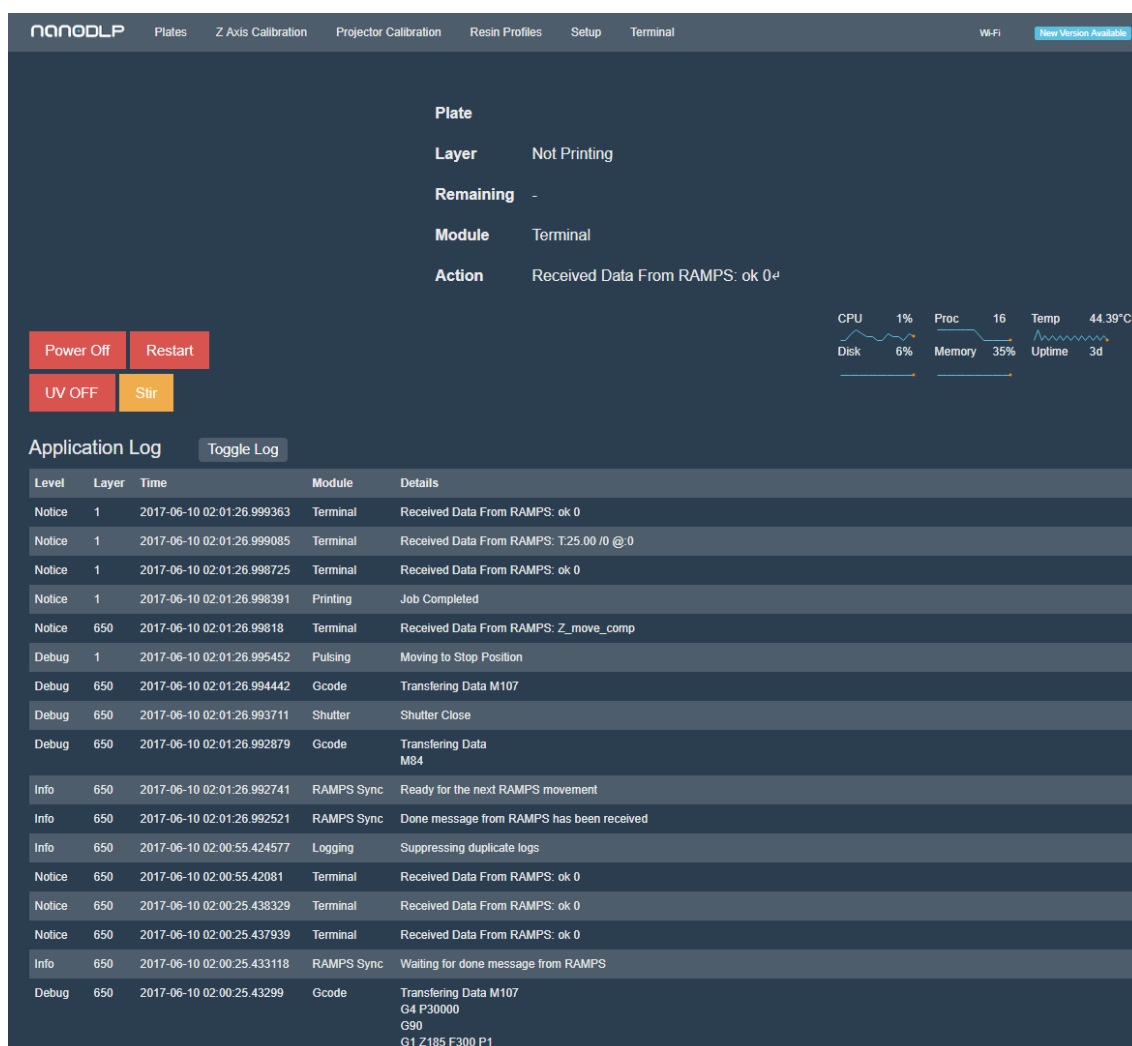
4.4.2.1 PREPROCESSING

- **Editace a modelování**

Výstupní soubor 3D skenování byl dále editován v programu Autodesk Netfabb, kde bylo využito stejných kroků jako v případě modelování 3D modelu *HB9* popsané v kapitole 4.6.2.5 REDUKCE - HB9. Každý 3D model byl zkontrolován a případně opraven již po naimportování do programu Netfabb. Výstupem byl soubor .stl.

- **Slicer + Řízení 3D tisku**

3D tisk byl kontrolován dálkově prostřednictvím bezdrátové sítě Wifi skrze NANODLP (Build 1437) běžícím na „Raspberry Pi 3 Model B 64-bit 1GB RAM“ jako zdroj elektrické energie byla použita baterie s výstupem 5 V o kapacitě 63 Wh.



The screenshot displays the NANODLP control interface. At the top, there are navigation tabs: Plates, Z Axis Calibration, Projector Calibration, Resin Profiles, Setup, and Terminal. A 'New Version Available' notification is present in the top right corner. The main area shows the current state of the printer: Plate, Layer (Not Printing), Remaining (-), Module (Terminal), and Action (Received Data From RAMPS: ok 0). Below this, there are control buttons: Power Off, Restart, UV OFF, and Stir. A system status section shows CPU (1%), Proc (16), Temp (44.39°C), Disk (6%), Memory (35%), and Uptime (3d). The Application Log is visible, with a 'Toggle Log' button. The log table contains the following entries:

Level	Layer	Time	Module	Details
Notice	1	2017-06-10 02:01:26.999363	Terminal	Received Data From RAMPS: ok 0
Notice	1	2017-06-10 02:01:26.999085	Terminal	Received Data From RAMPS: T:25.00 /0 @:0
Notice	1	2017-06-10 02:01:26.998725	Terminal	Received Data From RAMPS: ok 0
Notice	1	2017-06-10 02:01:26.998391	Printing	Job Completed
Notice	650	2017-06-10 02:01:26.99818	Terminal	Received Data From RAMPS: Z_move_comp
Debug	1	2017-06-10 02:01:26.995452	Pulsing	Moving to Stop Position
Debug	650	2017-06-10 02:01:26.994442	Gcode	Transferring Data M107
Debug	650	2017-06-10 02:01:26.993711	Shutter	Shutter Close
Debug	650	2017-06-10 02:01:26.992879	Gcode	Transferring Data M84
Info	650	2017-06-10 02:01:26.992741	RAMPS Sync	Ready for the next RAMPS movement
Info	650	2017-06-10 02:01:26.992521	RAMPS Sync	Done message from RAMPS has been received
Info	650	2017-06-10 02:00:55.424577	Logging	Suppressing duplicate logs
Notice	650	2017-06-10 02:00:55.42081	Terminal	Received Data From RAMPS: ok 0
Notice	650	2017-06-10 02:00:25.438329	Terminal	Received Data From RAMPS: ok 0
Notice	650	2017-06-10 02:00:25.437939	Terminal	Received Data From RAMPS: ok 0
Info	650	2017-06-10 02:00:25.433118	RAMPS Sync	Waiting for done message from RAMPS
Debug	650	2017-06-10 02:00:25.43299	Gcode	Transferring Data M107 G4 P30000 G90 G1 Z185 F300 P1

Obrázek 32 – Rozhraní a log Nano DLP (vlastní archiv)

4.4.2.2 PROCESSING

Technologie 3D tisku DLP, která byla zvolena pro potřeby této práce na základě rešerše, je zajímavá mimo jiné cenovou hladinou jednotlivých 3D tiskáren v porovnání s tiskárnami technologie SLA a přesto jde o velmi podobné technologie, kde jediným významným omezením je doba, která je potřebná k vytvrzení jedné vrstvy jelikož 3D tiskárny vycházející z technologie SLA mají zpravidla silnější zdroje elektromagnetického záření byť o velmi podobné vlnové délce (kolem 405 nm). Navíc byl brán v potaz předpoklad, že schopnost produkovat isotropní objekty je stejná jako v případě SLA 3D tiskáren (isotropnost pro potřeby 3D tisku lze chápat jako schopnost produkovat fyzické objekty, které mají stejné vlastnosti z hlediska pevnosti v tahu v osách X,Y jako v ose Z) (Formlabs, 2016).

- **Tiskový materiál Resin**

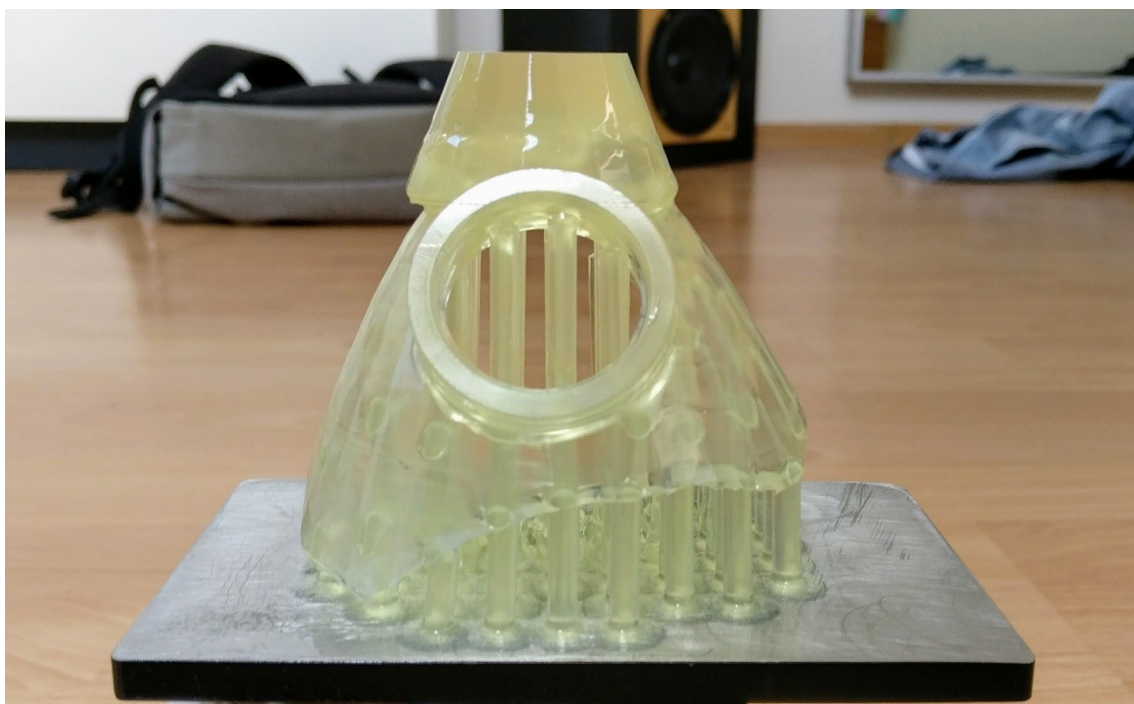
Resin, který byl využíván pro celou práci:

- DAYLIGHT FIRM RESIN (SKU: BR3DBLK01-DL-FIRM)
- UV HARD RESIN- DLP PRINTERS (SKU: BR3DCL01-UV-HARD)
- UV FLEXIBLE RESIN- DLP PRINTERS (SKU: BR3DCL01-UV-FLEXI)

Objekty s označením na konci „C“ byly vytisknuty s použitím druhého z výše uvedených resinů a objekty s označením „B“ prvním. Třetí resin byl použit pro kalibraci a testovací 3D tisk. Vzhledem, k tomu že většina materiálů není certifikována jako biokompatibilní a v tekuté formě před vytvrzením je nežádoucí inhalace a kontakt s kůží byly použity latexové rukavice a 3D tisk probíhal v uzavřeném prostředí viz kapitola „4.5 PROSTŘEDÍ PRO POTŘEBY EXPERIMENTU“. Před použitím, byl resin vždy důkladně promíchán.

- **3D tiskárna**

Fáze 3D tisku vzorku byla realizována na modifikované verzi tiskárny *WANHAO DUPLICATOR 7* vycházející dle výrobce z technologie DLP, ve skutečnosti, ale využívá k vytvrzení resinu LCD panel s rozlišením 2K, kterému byla odstraněna vrstva LED podsvícení a místo ní byla umístěna UV dioda emitující elektromagnetické záření o vlnové délce 405 nm (přesněji jde o spektrum blízké UV záření, je tedy stále viditelné lidskému oku). Pro každý tisk bylo použito umístění modelu na tiskovou platformu tak, aby nedocházelo k opětovnému tisku na již jednou exponovaném FEP filmu (FEP - izolační fólie / film oddělující resin od UV záření) oddělujícím resin od displeje pomocí kterého je vytvrzován. Jakmile byly možnosti rozmístění vyčerpány byl film (FEP) výměn za nový. Tiskárna byla napájena 12 V baterii „*Varta Blue Dynamic*“ (o celkové kapacitě 720 Wh), případně baterií „*Elnika economy*“ (o celkové kapacitě 86,4 Wh pro 3D tisky, kde nebyla předpokládaná doba 3D tisku delší než 90 minut). 3D tiskárna byla nastavena na výšku tiskové vrstvy 0.1 mm. Množství použitého resinu bylo konstantní pro všechny modely bez ohledu na jejich objem (120 ml). Kalibrační tisk 3D modelu „*HB10*“ viz. Obr. 33.

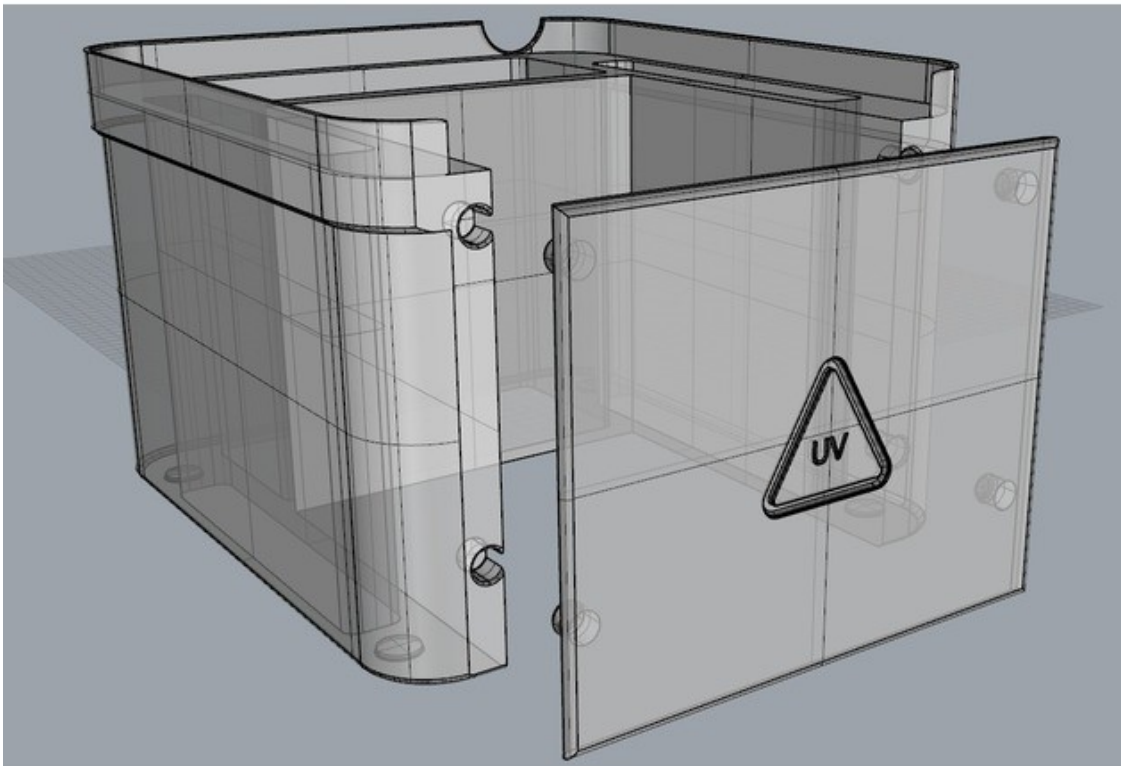


Obrázek 33 -Improvizovaná ochranná maska s označením „*HB10*“ včetně podpor (vlastní archiv)

4.4.2.3 POST PROCESSING

V rámci postprocessingu byly zahrnuty dva kroky:

- Zbavení vzorku zbytku nevytvrzeného resinu, který na modelu uvízl pomocí ultrazvukové čističky v roztoku složeného z 10 ml saponátu s tenzidy a 700 ml vody o teplotě 45 °C. Program čištění v ultrazvukové čističce proběhl vždy jedenkrát po dobu 480 s následně byla voda vyměněna a cyklus se opakoval tentokrát v čisté vodě stejné teploty po dobu 240 s.
- Dotčené vytvrzení resinu v UV komoře (obr 34) se zářivkami o celkovém výkonu 36 W a vlnové délce 405 nm (stejně jako vlnová délka UV diody samotné 3D tiskárny). Dodatečné vytvrzování probíhalo po dobu 10 minut ve vodní lázni a následně po osušení dalších 90 minut pro dosažení ideálních vlastností dle materiálu



Obrázek 34 – UV Box Assistant (Zenobi, 2017)

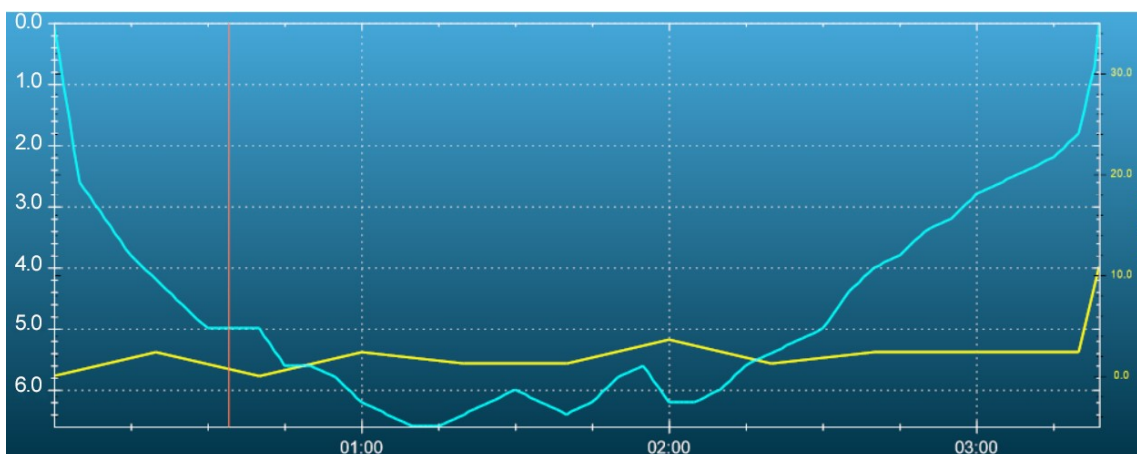
4.5 VÝZKUMNÉ PROSTŘEDÍ

Fáze 3D tisku processing (samotný 3D tisk) probíhala v improvizované hyperbarické komoře, kde byl udržován stálý tlak odpovídající hodnotě $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$. Hodnota $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ byla určena jako mez, kdy bylo možné přetlak udržovat jen pomocí drobných korekcí kompresoru napojeného na autoventil v horní části komory. Maximální dosažený tlak v komoře byl ještě o několik desítek kPa vyšší, ale byl doprovázen výraznou deformací stěn a komora se tak stávala labilní, což značně komplikovalo možnost umístění tiskárny dovnitř bez rizika převrnutí komory a zničení vybavení případně vylití nevytvrzeného resinu z rezervoáru pro tisk. Dalším problémem při vyšším tlaku byla výrazná netěsnost, kterou již nebylo možné korigovat dostupným kompresorem. Použitý Kompresor byl shodný s kompresorem popsáným v kapitole „4.6.2.1 ZDROJ VZDUCHU – KOMPRESOR, DUŠE S AUTOVENTILEM“. Objem komory byl 60 l a byla tak mobilní a snadno přenositelná v případě potřeby. Komora byla dále vybavena zaslepeným otvorem se závitem 3/4" pro potřebu rychlého vypuštění vzduchu. Fotografie jsou součástí přílohy číslo 3.

V hyperbarické komoře se nacházela následující zařízení zejména pro monitorování vnitřní atmosféry:

- **Mares icon hd**

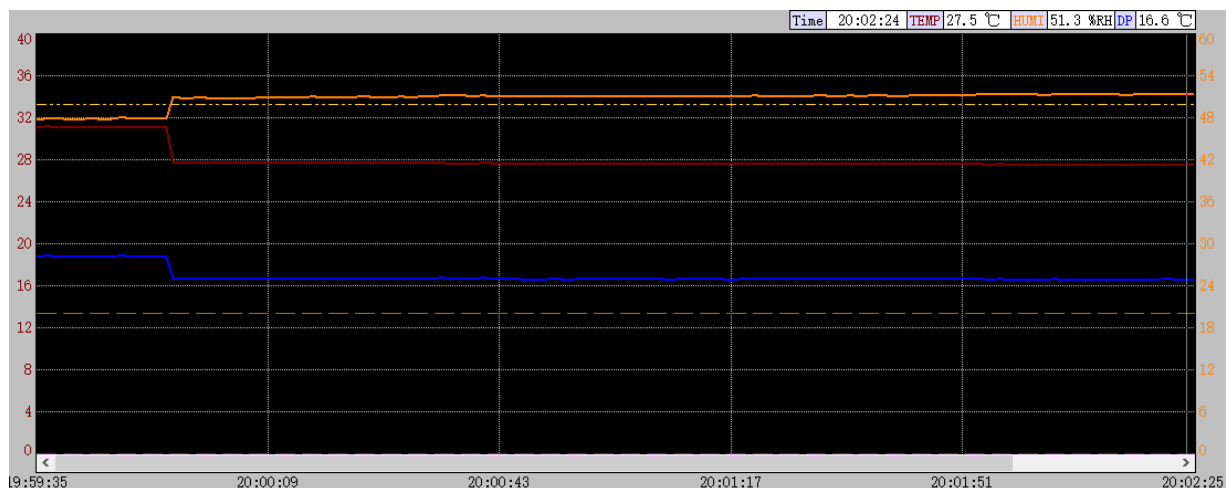
potápěčský počítač „Mares icon hd“ sloužil k monitorování profilu tlaku z hlediska profilu ponoru ukázka dat profilu v metrech je zobrazena na obr. 35.



Obrázek 35 profil kalibračního ponoru (vlastní archiv)

- **OEM Temperature and Humidity data logger**

dalším zařízením monitorujícím vnitřní atmosféru bylo zařízení na záznam teploty a relativní vlhkosti, která byla zpracovaná pomocí sw „*HT Communicator tool*“ verze 1.0. Zpracování dat kalibračního ponoru na obr. 36.



Obrázek 36 – Data kalibračního ponoru programu „*HT communication tool*“ (vlastní archiv)

- **tlakoměr M1**

Přesné odečítání hodnot pro potřeby regulování tlaku během samotného tisku bylo zajištěno tlakoměrem „*Engeneering corporation MI 200kPa*“. Tlakoměr byl určen k měření max. 200 KPa respektive 2 bar. Kontrolní odečítání hodnot. Bylo prováděno vždy jednou za 10 minut, Specifikace jsou zaneseny v tabulce 21.

Přesnost 20 % - 100 % rozsahu	± 0,2 % odečtu
Přesnost 0 % - 20 % rozsahu	± 0,04 % odečt
Provozní teplota	-10 °C až +50 °C
Maximální provozní tlak	110% rozsahu

Tabulka 20 specifikaci tlakoměru (vlastní archiv – manuál výrobce)

4.6 TEST FUNKČNOSTI

Test Funkčnosti byl navržen tak, aby umožnil testování objektů vycházejících z 3D *VAI* modelu za co možná nejvíce konzistentních podmínek a minimálních finančních nároků a zároveň nepřímo testovat funkčnost samotné 3D tiskárny.

4.6.1 3D MODEL V_A

3D model V_A – originálním názvem *Echo | 3 tone whistle* je svým charakterem malá píšťala nebo-li speciální akustické zařízení určené pro vydávání intenzivního zvuku o vyšších frekvencích pomocí vyfukování vzduchu z lidských plic (wikipedie, 2016). Tedy jde o předmět, které má jasně určenou funkci. 3D model V_A je charakteristický deklarovanou hlasitostí až 129 dB. Pro potřeby testování 3D tisku je ideální, jelikož klade vysoké nároky na celistvost jednotlivých struktur, které by mohly ovlivnit funkčnost samotného vzorku. Napojení jednotlivých vrstev musí být precizní tedy bez nežádoucích mezer.

4.6.2 SOUPIS POMŮCEK

4.6.2.1 ZDROJ VZDUCHU – KOMPRESOR, DUŠE S AUTOVENTILEM

Kompresor *MATRIX ac 2000-25* parametry viz. Tabulka 21.

Příkon	1500 W
Objem tlakové nádoby	24 l
Maximální pracovní tlak	8 bar
Maximální Průtok	206 l / min
Napájení	AC 230 V

Tabulka 21 – parametry kompresoru *MATRIX ac 2000-25* (vlastní archiv – manuál výrobce)

4.6.2.2 ŠPUNTY DO UŠÍ

Voskové špunty do uší *ohropax classic 1 pár* se zvukovou izolací v souladu s normou EN 24869-1.

4.6.2.3 ZVUKOMĚR

Zvukoměr aplikace *Zvukoměr: Soud Meter* od vývojářského studia *Smart Tools co.* Pracující na mobilním telefonu ONEPLUS A3003 s verzí systému Android 6.0.1 (Z hlediska HW omezení maximálního měřitelného rozsahu 85 dB.)

4.6.2.4 ČASOVAČ – ODPOČET ČASU

Systémová aplikace časovač ve verzi Androidu 6.0.1. ovládaná pomocí hlasových příkazů „*set timer*“ a „*4 seconds*“ s hlasovou odezvou pro start odpočtu zajišťovaných hlasovým asistentem *Google Now*.

4.6.2.5 REDUKCE - HB9

Redukce HB9 zajišťující plynulé napojení mezi zdrojem vzduchu a testovaným vzorkem. 3D model byl vymodelován v programu *autodesk netfabb* využitím zejména nabídky základních primitiv a kombinací několika funkcí *Boolean* (kombinování dvou a více objektů na základě logických operací jejich geometrie např. sjednocování více těles v jeden celek nebo odečítání jednoho tělesa od druhého). 3D model je blíže specifikován v kapitole 4.1.1.3 HYPOTÉZA HB.

4.6.3 NÁVOD K TESTU

4.6.3.1 PŘÍPRAVA KOMPRESORU

Před provedením každého testu musel počáteční absolutní tlak vzduchu v tlakové nádobě odpovídat hodnotě 4 bar. Výsledek prvního měření nebyl zaznamenán. Doplnění tlakové nádoby probíhalo při okolní teplotě vzduchu 30,5 °C, Relativní vlhkosti 48 % a atmosférickém tlaku vzduchu 1017,9 hPa ± 2 kPa. Kontrolní odečet hodnoty tlaku v tlakové nádobě po doplnění byl vždy prováděn zároveň se záznamem teploty tlakové nádoby pomocí bezkontaktního teploměru s přesností ± 1°C. Proces doplňování vzduchu byl opakován s pauzami, dokud nebylo dosaženo absolutního tlaku 4 bar při konstantní teplotě s tolerancí ± 1°C. (V praxi nedocházelo k výraznému zahřívání a prodleva v přípravě kompresoru nikdy nepřesáhla 10 minut)

4.6.3.2 ZAPOJENÍ CELÉ SOUSTAVY

Testovaný objekt byl nasazen na protikus vytvořený na základě 3D modelu *HB9* tvořící redukci mezi vzorkem samotným a napojením na kompresor pomocí výstupu o průměru auto ventilu (umožňujícím alternativně použít i duši jakožto zdroj vzduchu).

4.6.3.3 ROZMÍSTĚNÍ A PŘÍPRAVA OBJEKTŮ

Zvukoměr (viz. kapitola „4.6.2.3 ZVUKOMĚR“) byl umístěn 2 m od testovaného objektu na stativu (zvukoměr byl nasměrován mikrofony k testovanému objektu). Testované objekty (viz. kapitola „4.1.1.2 OBJEKTY – VĚDECKÉ OTÁZKY VA „) byly zasunuty do objektu *HB9* (viz. kapitola „4.1.1.3 3D MODEL Y - HYPOTÉZA HB - 3D model *HB9* – Redukce na objekty vzniklé na základě 3D modelu *VA1*“). Následně byl aktuálně testovaný objekt spolu s redukcí (*HB9*) umístěn vždy na stejné místo.

4.6.3.4 TESTOVÁNÍ

Testování probíhalo stisknutím kohoutu regulujícího průtok vzduchu na maximum spolu s hlasovým oznámením začátku odpočtu dlouhého 4 s. Následně po autisticko-vizuálním signálu o ukončení odpočtu byl přívod vzduchu okamžitě uzavřen povolením kohoutku regulujícího průtok zvuku.

4.6.3.5 VYHODNOCOVÁNÍ

Ke klasifikaci sloužila stupnice:

- 1 - funguje
- 0 - nefunguje

Kde *1 – funguje* odpovídá hodnotě maxima hlasitosti ≥ 70 dB. *0* – poté odpovídá zbytku hodnot mimo tuto podmínku. Hodnota 70 dB, byla odvozena od hodnoty 76 dB kterou lze označit za referenční, je výsledkem průměru deseti opakovaných měření (zaokrouhleného na celé jednotky dB) vzorku vytisknutého za atmosférického tlaku $101,78 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$.

5 VÝSLEDKY

5.1 SELEKCE 3D TISKÁRNY, MODIFIKACE A CHARAKTERISTIKY PROSTŘEDÍ

Stěžním úkolem byla bezesporu selekce vhodné tiskárny a tiskové technologie. Vzhledem k finančnímu rozpočtu práce byl výběr limitován na volbu mezi technologií 3D tisku DLP a FDM přičemž uvedl (Redwood, 2016) „*If high accuracy is critical (and there are no budget constraints), material jetting is the optimal solution. For high accuracy parts smaller than 1000 cm³ (10 x 10 x 10), SLA is recommended. For parts greater than 1000 cm³ (10 x 10 x 10) SLS is the best solution. For low accuracy, quick, cost effective prototyping FDM is recommended.*“ Tedy volba 3D tiskárna založená na technologii FDM vzhledem k jejím limitacím nepřipadala v úvahu. S ohledem na technologickou podobnost mezi technologiemi SLA a DLP (blíže specifikovanou v kapitole „2.1.2 NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ TECHNOLOGIE“) bylo přistoupeno k substituování technologie SLA derivátem technologie DLP. Volba HW samotného byla omezena nízkou rozšířeností této technologie. Původně zamýšlena 3D tiskárna byla z důvodu nespolehlivosti dodavatele vyměněna za model „*Wanhao duplicator 7*“ (detail 3D tiskárny viz příloha číslo 4) vynikající zejména rozsáhlou uživatelskou komunitou fungující na principu P2P (Peer-to-peer / rovný s rovným).

Zvolena 3D tiskárna vycházela částečně z otevřeného řešení. Výhoda byla ve významně dostupnějších náhradních a rozšiřujících dílech, nevýhoda (zapříčiněná zejména volným prodejem 3D tiskárny před odladěním závažných nedostatků) v malé konzistenci 3D tisku zejména pak způsobované kineticky nežádoucí aktivitou trapézového šroubu pohybujícího tiskovou platformou po ose „Z“ jednotlivé záchvěvy se přenášely dále do ostatních komponent a vedly k nepřesnému napojení jednotlivých vrstev. Přičemž problém, byl značně redukován vložení do soustavy pružné spojky, která část nežádoucích záchvěvů absorbovala.

Naopak překvapující byla funkčnost (vzhledem k časově náročné kalibraci za atmosférického tlaku $101.7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$), kdy již první zkušební suchý 3D tisk v improvizované hyperbarické komoře byl úspěšný s relativní vlhkostí lokální atmosféry $60 \% \pm 3 \%$, což bylo o 10% více než-li doporučuje deklarace výrobce ($20 \% - 50 \%$) a za průměrné teploty $27,6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. A právě možná vyšší relativní vlhkost byla jedním z potenciálních limitů jednotlivých především elektronických komponent 3D tiskárny. V praxi však tato limitace nebyla pozorována během samotných kalibračních tisků (kdy byla 3D tiskárna schopna dokončit tisk všech plánovaných objektů na základě předloh v podobě 3D modelů formátu .stl), ani v průběhu experimentálního 3D tisku v hyperbarickém prostředí, kdy se vlhkost pohybovala jen na průměrné hodnotě $55,3 \% \pm 3 \%$ (v porovnání se zkušebním suchým tiskem) a překračovala doporučenou úroveň vlhkosti jen o $5,3 \% \pm 3 \%$. Průměrná teplota v průběhu trvání experimentu se pohybovala na úrovni $33,2 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ (deklarace výrobce uvádí rozsah provozních teplot $15^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$).

Vzhledem k potřebě snadné manipulace, byla vybrána relativně malá hyperbarická komora o objemu 60 l. Tento fakt sebou nesl riziko možného výrazného přehřívání jak 3D tiskárny vlivem odpadního tepla tak i funkčnosti 3D tiskárny řádně vytvářet jednotlivé vrstvy. Ani jedna z výše zmiňovaných komplikací se ovšem v nebyla pozorována.

Maximální tlak vnitřní atmosféry v improvizované hyperbarické komoře, který bylo možné kontrolovaně udržovat $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ nebylo možné konfrontovat s doporučeným rozsahem provozního atmosférického tlaku výrobce, jelikož nebyl v technické dokumentaci deklarován vůbec. Ostatní výrobci 3D tiskáren (pokud vůbec tento údaj deklarují) zmiňují normální atmosférický tlak.

5.2 RESIN - TISKOVÝ MATERIÁL

V průběhu plánování samotné práce, byla technologie velmi mladá a samotný resin od firmy Photocentric (zančený: BR3DBLK01-DL-FIRM, BR3DCL01-UV-HARD, BR3DCL01-UV-FLEXI) využívaný v průběhu celé práce viz. Kapitola 4.4.2.2 PROCESSING, ještě nebyl opatřen dokumenty s daty o technických vlastnostech, stejně jako dokumentem SDS (safety data sheet - ekvivalent českého Bezpečnostního listu s bezpečnostními, ekologickými toxikologickými a dalšími informacemi) A ani nebyl dostatek informací o ostatních vlastnostech resinu (vzhledem k stále trvajícím podání patentu). Z čehož plynula obava o proveditelnosti experimentu. Vzhledem k vstřícnosti laboratoře vyvíjející tento resin se ale podařilo najít kompromis ve sdělování informací zejména o možné toxicitě a nutných krocích během dokončovací fáze 3D tisku (viz. kategorie „4.4.2.3 POST PROCESSING“).

Možnost očištění vytisknutého 3D objektu pouze v teplé vodě / případně v směsi teplé vody a saponátu výrazně snížila náročnost celého procesu, v porovnání s nutností používat k odstranění residua nevytvrzeného resinu ethanol případně isopropylalkohol. (Ultrazvuková čistička použitá v případě této práce není nutností a její účel byla zejména standardizace procesu umožňující co možný nejobjektivnější srovnání. V případě reprodukce objektu při využití 3D tiskárny s resinem vyžadujícím „očištění“ lze zbytkový resin odstranit i tkaninou případně, ve vodě pouze omýt. Možnost jisté improvizace při uspokojení poptávky on-demand v uzavřeném prostoru jako je úkryt je velmi žádoucí.)

5.3 HYPOTÉZA H_B

Výsledky experimentu zaměřeného na testování hypotézy H_B respektive její falsifikace na základě statistického testování a výsledky znázorňující možnou věcnou významnost byly prezentovány v grafech a tabulkách dat zpracovaných dle kapitoly „4.3 ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA DAT“.

5.3.1 VSTUPNÍ DATA

Níže uvedená *vstupní data* jsou uvedena do tabulek dle jednotlivých 3D modelů ze kterých vychází (viz. kapitola „4.1.1.3 3D MODEL Y - HYPOTÉZA H_B “) a dále členěna na samotné fyzické objekty (viz. kapitola „4.1.1.4 FYZICKÉ OBJEKTY - HYPOTÉZA H_B “).

5.3.1.1 MODEL - HB1

Fyzický objekt	HB1-1-B-A	HB1-1-B-H
Měření I - [g]	0.87	0.89
Měření II - [g]	0.87	0.89
Měření III- [g]	0.87	0.89
Měření IV- [g]	0.87	0.89
Měření V- [g]	0.87	0.89
Průměr \bar{O} - [g]	0.87	0.89
Variační koeficient [%]	2,20	2,30

Tabulka 22 – Výsledky měření HB1

5.3.1.2 MODEL – HB2

Fyzický objekt	HB2-1-B-A	HB2-1-B-H
Měření I - [g]	0.54	0.54
Měření II - [g]	0.54	0.54
Měření III- [g]	0.54	0.54
Měření IV- [g]	0.54	0.54
Měření V- [g]	0.54	0.54
Průměr \bar{O} - [g]	0.54	0.54
Variační koeficient [%]	0	0

Tabulka 23 – Výsledky měření HB2

5.3.1.3 MODEL – HB3

Fyzický objekt	HB3-1-B-A	HB3-1-B-H
Měření I - [g]	16.98	17.23
Měření II - [g]	16.99	17.24
Měření III- [g]	16.98	17.24
Měření IV- [g]	16.98	17.24
Měření V- [g]	16.99	17.23
Průměr Ø - [g]	16.99	17.24
Variační koeficient [%]	1,30	2,40

Tabulka 24 – Výsledky měření HB3

5.3.1.4 MODEL – HB4

Fyzický objekt	HB4-1-B-A	HB4-1-B-H
Měření I - [g]	1.52	1.55
Měření II - [g]	1.52	1.55
Měření III- [g]	1.52	1.55
Měření IV- [g]	1.52	1.55
Měření V- [g]	1.52	1.55
Průměr Ø - [g]	1.52	1.55
Variační koeficient [%]	0	0

Tabulka 25 – Výsledky měření HB4

5.3.1.5 MODEL – HB5

Fyzický objekt	HB5-1-B-A	HB5-1-B-H
Měření I - [g]	0.37	0.39
Měření II - [g]	0.37	0.39
Měření III- [g]	0.37	0.39
Měření IV- [g]	0.37	0.39
Měření V- [g]	0.37	0.39
Průměr Ø - [g]	0.37	0.39
Variační koeficient [%]	0	0

Tabulka 26 – Výsledky měření HB5

5.3.1.6 MODEL – HB6

Fyzický objekt	HB6-1-B-A	HB6-1-B-H
Měření I - [g]	3.05	3.11
Měření II - [g]	3.05	3.11
Měření III- [g]	3.05	3.11
Měření IV- [g]	3.05	3.11
Měření V- [g]	3.05	3.11
Průměr Ø - [g]	3.05	3.11
Variační koeficient [%]	0	0

Tabulka 27 – Výsledky měření HB6

5.3.1.7 MODEL – HB7

Fyzický objekt	HB7-1-B-A	HB7-1-B-H
Měření I - [g]	2.90	2.99
Měření II - [g]	2.90	2.99
Měření III- [g]	2.90	2.99
Měření IV- [g]	2.90	2.99
Měření V- [g]	2.90	2.99
Průměr Ø - [g]	2.90	2.99
Variační koeficient [%]	0	0

Tabulka 28 – Výsledky měření HB7

5.3.1.8 MODEL – HB8

Fyzický objekt	HB8-1-B-A	HB8-1-B-H
Měření I - [g]	39.12	39.27
Měření II - [g]	39.12	39.26
Měření III- [g]	39.12	39.28
Měření IV- [g]	39.11	39.25
Měření V- [g]	39.12	39.25
Průměr Ø - [g]	39.12	39.26
Variační koeficient [%]	1,70	3,70

Tabulka 29 – Výsledky měření HB8

5.3.1.9 MODEL – HB9

Fyzický objekt	HB9-1-B-A	HB9-1-B-H
Měření I - [g]	30.29	30.85
Měření II - [g]	30.29	30.85
Měření III- [g]	30.29	30.86
Měření IV- [g]	30.30	30.86
Měření V- [g]	30.28	30.83
Průměr Ø - [g]	30.29	30.85
Variační koeficient [%]	2,20	3,00

Tabulka 30 – Výsledky měření HB9

5.3.1.10 MODEL – HB10

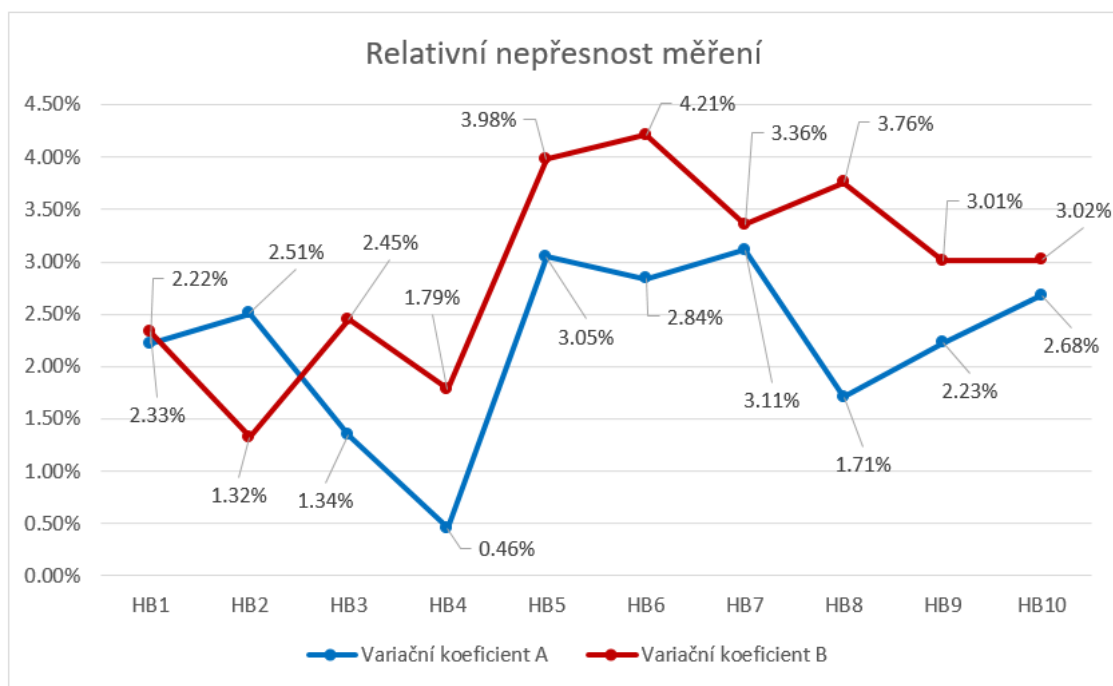
Fyzický objekt	HB10-1-B-A	HB10-1-B-H
Měření I - [g]	63.48	64.73
Měření II - [g]	63.44	64.77
Měření III- [g]	63.45	64.72
Měření IV- [g]	63.44	64.73
Měření V- [g]	63.46	64.76
Průměr Ø - [g]	63.45	64.74
Variační koeficient [%]	2,60	3,00

Tabulka 31 – Výsledky měření HB10

5.3.2 T-TEST A RELATIVNÍ NEPŘESNOST MĚŘENÍ

Relativní nepřesnost měření zobrazená na grafu 1 prostřednictvím datové sady *Variačního koeficientu A* a *Variačního koeficientu B* zpracovaných na základě vstupních dat z kategorie „5.3.1 VSTUPNÍ DATA“ naznačuje nekonzistenci měření, která je ovšem částečně zkreslena zaokrouhlováním tabulkového editoru excel a malé přesnosti měření na dvě desetinná místa, která u objektů s hmotností pod 1 g mohou vlivem zaokrouhlování hmotnost. Proto byla následně data zpracována striktnější variantou T-Testu

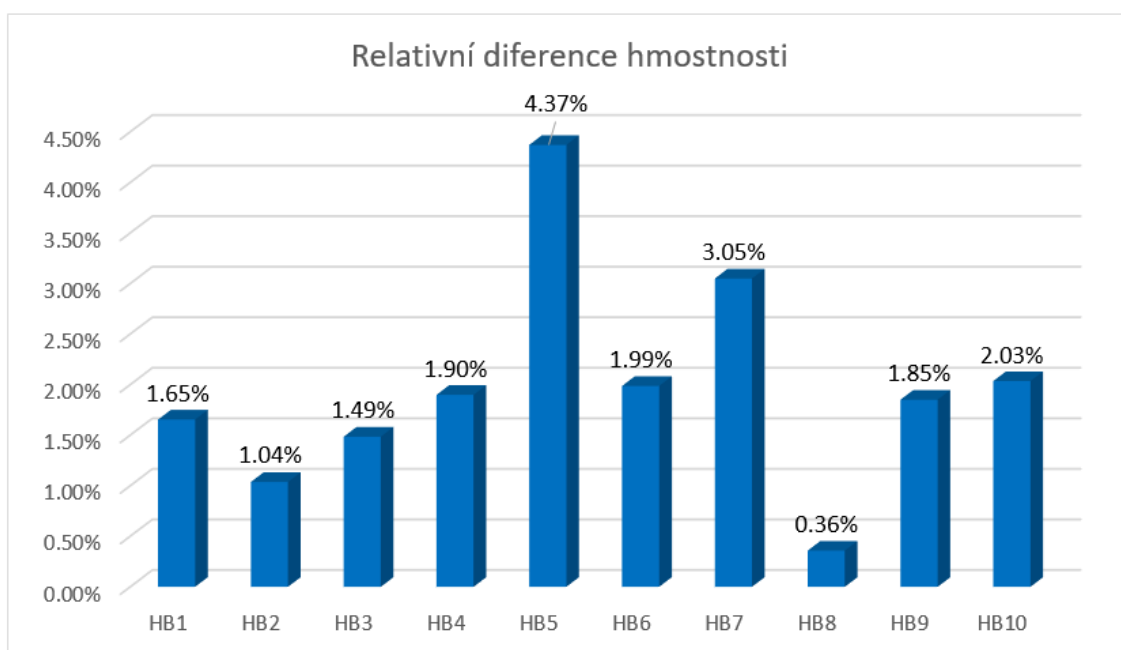
Výsledek T-testu „ $p = 0.98026$ “ srovnávající hmotnost objektů získaných za atmosférického tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ a objektů získaných při absolutním tlaku $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ nedeterminoval statisticky signifikantní rozdíl, jinými slovy rozdíl není statisticky významný při $\alpha = 0,05$.



Graf 1 – Relativní nepřesnost měření; Variační koeficient A a Variační koeficient B

5.3.1 ZHODNOCENÍ VĚCNÉ VÝZNAMNOSTI

Z hlediska věcné významnosti u žádného objektu nebyl pozorován rozdíl v hmotnosti větší než 5 % u objektů vytisknutých za atmosférického tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ a objektů vytisknutých při absolutním tlaku $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$. Respektive vždy byl v rámci sledovaného kritéria $\leq 5 \%$ (graf 2). Nejblíže onomu limitu byly objekty „HB5-I-B-A“ a „HB5-I-B-H“. Tyto objekty mají z celého vzorku nejmenší hmotnost a tak relativní vyjádření difference jejich hmotnosti může být poněkud zavádějící, 3D model je tvořen složitou strukturou, která do jisté míry ospravedlňuje rozdíl ve hmotnosti 4,37 %. Přesto lze výsledek z praktického hlediska považovat za velmi dobrý.

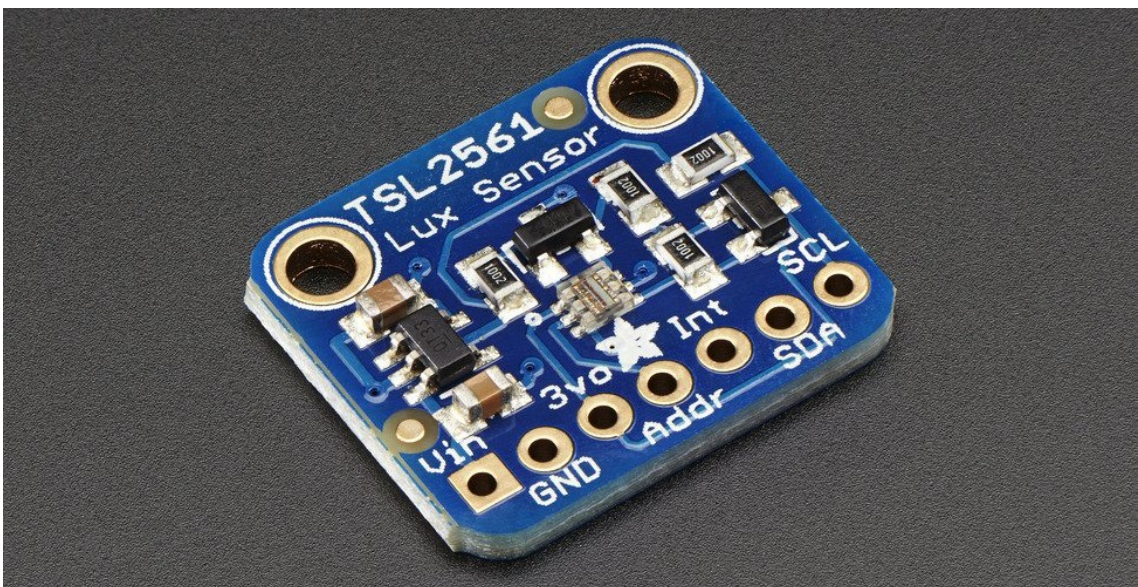


Graf 2 – Relativní difference hmotnosti

Během experimentu se objevila anomálie u objektů HB8-1-B-A a HB8-1-B-H zobrazená na obr 37. a sice chybějící kus rukojeti. Tato anomálie se projevila u obou objektů vizuálně identicky. Z hlediska sledovaného parametru hmotnosti jde dle deklarované hustoty resinu odhadnout rozdíl hmotnosti mezi 3D modelem HB8 a fyzickými objekty na cca 1,5 g. Tato nedokonalost může být zapříčiněna nerovnoměrně osvětlenou plochou samotného LCD displeje nebo částečně zakrytým kuželem elektromagnetického záření. Pro potřeby dalších experimentů, by bylo vhodné zařadit tetovací suchý 3D tisk u kterého by byla monitorována a analyzována intenzita osvětlení LCD displeje například proprietárním HW s fotorezistorem / komplexnějším řešením s Lux Sensorem TSL2561 (viz orb. 38).



Obrázek 37 – HB8 - anomálie (vlastní archiv)



Obrázek 38 –TSL2561 lux sensor (Adafruit; 2014)

5.4 ZHODNOCENÍ VĚDECKÉ OTÁZKY V_A

Data pro potřeby třídění vědeckých otázek V_A (V_{A1} a V_{A2}) byla získaná dle výsledku nepřímého testu funkčnosti popsaném v kapitole „4.7 TEST FUNKČNOSTI“, jehož výstupem bylo hodnocení principu binárních dat tedy „1“ (funguje) a „0“ (nefunguje). Výsledky testu jsou uvedeny v tabulce 33 pro objekty z materiálu s označením „BR3DBLK01-DL-FIRM“ a pro objekty z materiálu „BR3DCL01-UV-HARD“ v tabulce 34. Tiskový materiál dále rozebírán v kategorii „4.4.2.2 PROCESSING“.

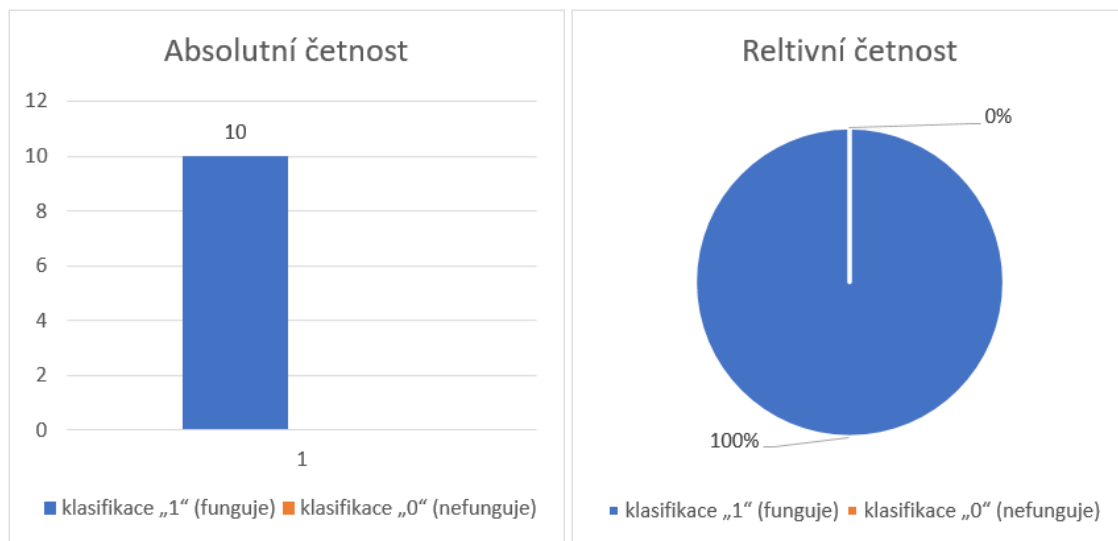
Označení objektu	Maximální dosažená hodnota [dB]	Logická klasifikace	Slovní klasifikace
VA1-1-B	72	1	funguje
VA1-2-B	74	1	funguje
VA1-3-B	77	1	funguje
VA1-4-B	77	1	funguje
VA1-5-B	75	1	funguje
VA1-6-B	72	1	funguje
VA1-7-B	73	1	funguje
VA1-8-B	75	1	funguje
VA1-9-B	74	1	funguje
VA1-10-B	73	1	funguje

Tabulka 32 – Výsledky měření objektu z materiálu BR3DBLK01-DL-FIRM

Označení objektu	Maximální dosažená hodnota [dB]	Logická klasifikace	Slovní klasifikace
VA1-1-C	75	1	funguje
VA1-2-C	75	1	funguje
VA1-3-C	72	1	funguje
VA1-4-C	71	1	funguje
VA1-5-C	75	1	funguje
VA1-6-C	73	1	funguje
VA1-7-C	77	1	funguje
VA1-8-C	77	1	funguje
VA1-9-C	72	1	funguje
VA1-10-C	75	1	funguje

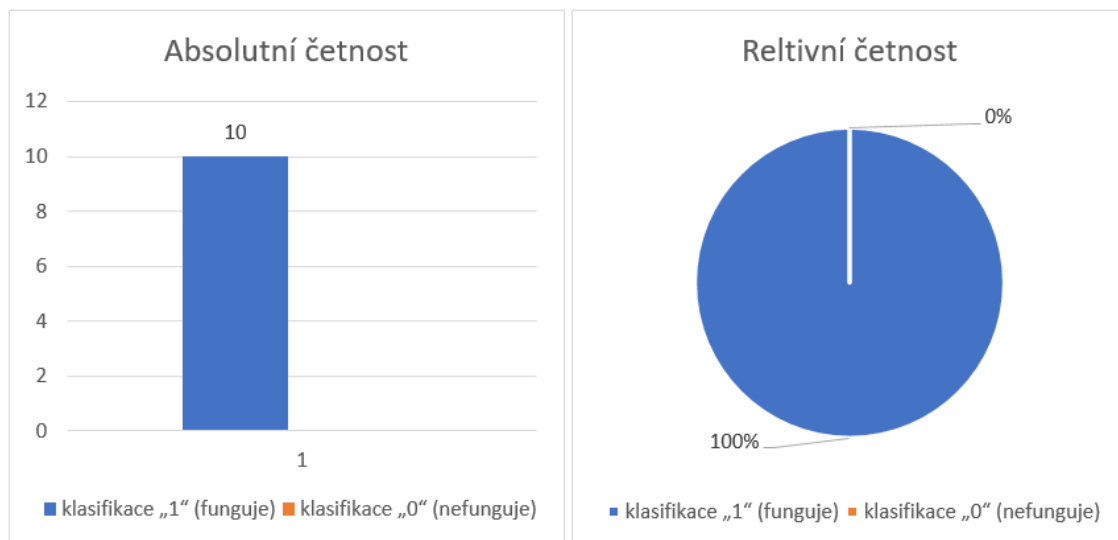
Tabulka 33 – Výsledky měření objektu z materiálu BR3DCL01-UV-HARD

Grafické znázornění četnosti klasifikace objektů vytisknutých z materiálu „BR3DBLK01-DL-FIRM“ jsou znázorněny na grafu 3 (absolutní četnost) a grafu 4 (relativní četnost).



Graf 3 – absolutní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DBLK01-DL-FIRM“; Graf 4 - relativní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DBLK01-DL-FIRM“

Grafické znázornění četnosti klasifikace objektů vytisknutých z materiálu „BR3DCL01-UV-HARD“ jsou znázorněny na grafu 5 (absolutní četnost) a grafu 6 (relativní četnost).



Graf 5 – absolutní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DCL01-UV-HARD“; Graf 6 - relativní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DCL01-UV-HARD“

6 DISKUSE

Vzhledem k tomu, že se během samotné teoretické části nepodařilo najít práci či odborný akademický článek pojednávající alespoň o některé ze zkoumaných problematik směrem k hyperbarickému prostředí, ale vždy šlo o konkrétní aplikaci 3D skenování a 3D tisku (ať už jednotlivě nebo společně) v praxi oborů jako: chirurgie, stomatologie, architektura, strojírenství atd.) či nejrůznější kvantifikované vlastnosti jednotlivých technologií 3D skenování a 3D tisku v rámci normálního atmosférického tlaku v rozmezí jednotek kPa, bylo možné výsledky konfrontovat pouze se zjištěními vyplývajících z výsledků této práce. Zkoumání alespoň 3D tisku v prostředí podtlaku na úrovni blíže nspecifikovaného stupni vakua probíhá, pro potřeby kosmonautiky již několik let (viz. kapitola „2.4.2 3D TISK – VAKUUM“), ale bylo možné se pouze domnívat, že z zejména z ekonomického hlediska není žádoucí dílčí části výzkumu publikovat před udělením patentu na konečný výrobek nebo dokonce vůbec (s možností zajistit si alespoň na omezené období monopol s případným vynálezem na úkor možného širšího vědeckého poznání a potenciálního vědeckého pokroku).

Z tohoto důvodu byla diskuze a doplněny o aspekty, které nutně nesouvisely se zkoumaným problémem v nejužším slova smyslu, ale tvoří potenciálně zajímavý kontext kritického hodnocení výsledků práce.

Selekce 3D tiskárny, modifikace a charakteristiky prostředí

Vzhledem k poznatkům uvedeným v kapitole „5.1 SELEKCE 3D TISKÁRNY, MODIFIKACE A CHARAKTERISIKY PROSTŘEDÍ“ retrospektivně vzato byla volba této tiskárny nutným kompromisem. Pro budoucí zkoumání problematiky 3D tisku v hyperbarickém prostředí by bylo vhodné zvolit 3D tiskárnu lépe kalibrovanou přímo výrobcem.

Resin - tiskový materiál

Z hlediska potenciální toxicity, která omezení představuje. Je možné se zaměřit na vývoj resinu jako takového, jelikož již dnes existují takové, které nabízí možnost biokompatibility (dle EN-ISO 10993-1:2009/AC:2010, USP Class VI). Tepelná odolnost takového resinu dovoluje i sterilizaci vytisknutého objektu a použití v rámci Stomatologické chirurgie dokládající (WHITLEY, Daniel a Sompop BENCHARIT, 2017) *Most importantly, this workflow establishes low-cost surgical guide production methods without a trade-off in quality. The clinical case demonstrated the ability to place an implant with accurate final placement that is well within the tolerances that previous dental 3D printing systems can achieve, resulting in extremely good clinical outcomes for the patient.* Dále je vhodné podotknout, že ani 3D tiskárna využívána na ISS založená na principu FDM není provozována mimo vlastní hermeticky oddělenou vnitřní atmosféru (viz kapitola „2.4.1.1 FDM 3D TISKÁRNA ISS“), což dále dokládá *The ability for the printer to filter toxic gases and nanoparticles was one of the most important technical challenges for operation approval aboard the ISS* (Madeinspace, 2015). Neopominutelným faktorem ovlivňující toxicitu resinu je jeho dokonalé vytvrzení, jelikož omezení z hlediska toxicity vyplývají z resinu v tekutém stavu, kdy se skládá z monomerů, oligomerů a aktivátorů, které se navázáním do řetězce komplexnější struktury přemění v samotný polymer, který má odlišné fyzikální i chemické vlastnosti (viz. kapitola „2.3.2 FOTOPOLYMERIZACE“).

Kapalné skupenství resinu vzhledem okolní teplotě tlaku a vlhkosti podléhá vaporizaci. Vaporizace je závislá mimo jiné na tlaku a lze se domnívat, že se v hyperbarickém prostředí bude vaporizace za předpokladu srovnatelných ostatních hodnot závislých veličin méně projevovat. Zkoumání vlivu hyperbarického prostředí na resin a chemický rozbor par by mohl odkrýt jak a zda jsou páry toxické při tomto přetlaku.

Pro praxi, je zatím hlavním omezením doporučení používat ochranné pomůcky zabraňující kontaktu napřímo s kůží (například rukavice) z důvodů možného podráždění / alergické reakce. Úroveň toxicity limitující použití v neodvětrávaném prostoru s možným důsledkem podráždění očí, by bylo vhodné korigovat v případech úkrytů s řízeným přetlakem umístěním celého zařízení 3D tiskárny mimo hermeticky oddělený „bezpečný prostor“ dále do technické místnosti, kde nouzový zdroj elektrické energie pověstnou pracuje na bázi spalování fosilních paliv a sám potřebuje filtraci nebo je díky

přetlaku vždy kontaminovaný plyn vyháněn směrem od „bezpečného prostoru“. konkrétní řešení je předmětem komplexního technického návrhu úkrytu a vyžaduje další zkoumání.

Hypotéza H_B

Výsledek statistického testování dat nedeterminoval statisticky signifikantní rozdíl, mezi jednotlivými skupinami srovnávaných objektů. Jinými slovy rozdíl není statisticky významný při $\alpha = 0,05$. Pro specifičtější porozumění je vhodné dále podotknout, že získanou hodnotu „ $p = 0,98026$ “ je také možné interpretovat takto: „Pravděpodobnost rozdílu v hmotnosti mezi objekty vytisknutými při atmosférickém tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ a objekty vytisknutými při absolutním tlaku $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ je $1,974 \%$.“

Z grafického znázornění věcné významnosti (konkrétně relativní difference hmotnost) se nejvíce přiblížily stanovenému limitu sledovaného kritéria (rozdílu v hmotnosti dvou zkoumaných skupin $\leq 5 \%$) objekty „HB5-1-B-A“ a „HB5-1-B-H“ s rozdílem hmotnosti $4,37 \%$. Ve všech deseti případech se pak rozdíl ve hmotnosti pohyboval v intervalu $\langle 0,35 \% - 4,37\% \rangle$.

Z hlediska vzorku 3D modelů a metody měření dat pro testování hypotézy H_B lze vyvodit dva zásadní možné nedostatky. Velikost vzorku ($n = 10$) není významně omezující z hlediska statistických metod, ale rozmanitost jednotlivých 3D modelů už svůj vliv na výsledek falsifikace hypotézy mít může. Proto by bylo vhodné zařadit při budoucím zkoumání „rozdílu hmotnosti mezi objekty“ i objekty s mnohem větším rozměrem v ose „Z“ (výškou), jelikož se jedná o problematickou dimenzi z principů konstrukce 3D tiskáren vycházejících z technologie DLP (viz. kapitola „2.1.2.3 DLP“). Dále naměřená data naznačují, že hmotnost některých objektů byla velmi nízká, případně rozlišovací schopnost použité váhy (viz. kapitola „4.2 SBĚR DAT“) nebyla dostatečně vysoká. Jako vhodné řešení se tedy jeví nahrazení části 3D modelů (s nízkou hmotností) modely s vyšší potenciální hmotností, případně využití techniky pro měření hmotnosti s přesností minimálně 10^{-4} g .

Vědecké otázky V_A

Výsledky proprietárního testu funkčnosti, které nepřímou odpovídají na vědeckou otázku V_{A1} a přímo na vědeckou otázku V_{A2} nasvědčují, že je možné předpokládat funkčnost 3D tiskárny v hyperbarickém prostředí charakteristicky blízkému experimentálnímu prostředí této práce, jelikož tiskárna byla schopna vytisknout 100 % funkčních objektů z hlediska testovaného kritéria funkčnosti.

Poznámka k testu: Test není v žádném případě standardizovaný natolik, aby jej bylo možné využít pro kvantitativní hodnocení hlasitosti objektů mimo výzkumný vzorek a nebyl ani dimenzován tak aby určil maximální hodnotu hlasitosti, které dokáže objekt v praxi dosáhnout. Test umožňuje jednoduše na základě klasifikace objekty třídít a předpokládat tak správnou funkčnost nástroje tedy 3D tiskárny, která je vytiskla a naznačit tak možnosti zaměření budoucího výzkumu. V jistém smyslu je 3D tiskárna tak univerzální nástroj jako matematika a její popis na základě kvantitativních dat je velmi specifický a úzce zaměřený pro zobecnitelné hodnocení správné funkčnosti. V práci se vycházelo z předpokladu, kdy 3D tiskárna je schopná tisku v hyperbarickém prostředí pomocí vědecké otázky V_{A2} a vědecká otázka V_{A2} byla založená na premise, kdy objekt je možné označit za funkční pouze pokud plní hlavní účel jeho zamýšlené existence. Malá píšťala je objektem s velmi jasným hlavním účelem a je zřejmé pro jakou primární funkci byla stvořena (jaký je její účel).

Je zde potenciální předpoklad, že tiskárna by mohla být schopna vytisknout opravdu funkční ochranou masku pro potřeby improvizované ochrany, či jiný předmět podobného charakteru. Předměty, které kladou vysoký nárok na soudržnost / kohesi a dále jejich na míru vytvořený design vycházející z individuálních odlišností lidského těla může značit zlepšit přilnavost takového objektu. Vzhledem k neprozkoumanosti problematiky reprodukce objektů, 3D tisku, 3D skenování vyvstávají další vědecké otázky, které si žádají pozornost.

Jistá nevýhoda testu také spočívá v nemožnosti kvantifikovat jako moc je fyzický objekt funkční a v možné subjektivitě kritéria určující mez funkčnosti. A v neposlední řadě byl použit pouze jeden 3D model.

7 ZÁVĚR

Bakalářská koncipována jako pilotní studie se zabývala reprodukcí objektů pomocí 3D tisku v hyperbarickém prostředí.

Na základě praktických poznatků z problematiky 3D tisku a teoretických východisek v této práci byly vyvozeny následující vědecké otázky: „*Je běžná finančně dostupná 3D tiskárna schopná tisku v hyperbarickém prostředí s minimem modifikací?*“ (značená V_{A1}) a „*Pakliže bude tiskárna schopna tisku v hyperbarickém prostředí budou testované vytisknuté objekty schopny plnit svůj účel?*“ (značená V_{A2}) Dle výsledků proprietárního testu funkčnosti, který nepřímou odpovídají na vědeckou otázku V_{A1} a přímo na vědeckou otázku V_{A2} lze předpokládat, že běžná finančně dostupná 3D tiskárna bude schopna tisku v hyperbarickém prostředí charakteristicky blízkému experimentálnímu prostředí této práce, jelikož tiskárna byla schopna vytisknout deset fyzických objektů z obou testovaných materiálů a zároveň na základě zvolených kritérií funkčnosti prošlo 100% objektů tímto testem.

Pro potřeby zkoumání rozdílu hmotnosti mezi objekty byla stanovena následující hypotéza: „*Mezi objekty vytisknutými při atmosférickém tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ a objekty vytisknutými při absolutním tlaku $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ bude v hmotnosti rozdíl.*“ T-test srovnávající hmotnost objektů vytisknutých za atmosférického tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ a objektů vytisknutých při absolutním tlaku $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ nedeterminoval statisticky signifikantní rozdíl, jinými slovy rozdíl není statisticky významný při $\alpha = 0,05$. Pro specifičtější porozumění je vhodné dále podotknout, že získanou hodnotu „ $p = 0,98026$ “ je také možné interpretovat takto: „*Pravděpodobnost rozdílu v hmotnosti mezi objekty vytisknutými při atmosférickém tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ a objekty vytisknutými při absolutním tlaku $150 \text{ kPa} \pm 3,6 \text{ kPa}$ je 1,974 %.*“ Z pohledu stále aktuálního trendu zkoumání hypotéz ze statistického hlediska lze považovat nemožnost falsifikace H_B za neúspěch. Ovšem statistický významnost říká pouze s jakým procentem chyby je možné výsledek zkoumání zobecnit a pro praktickou / věcnou významnost zejména při zkoumání relativně nové problematiky není zobecnění zcela směřodotné. Navíc T-test je koncipován k prokázání existence rozdílu nikoliv k prokázání jeho absence.

Z hlediska věcné významnosti, která byla definována diferencí hmotnosti $\leq 5\%$ (v porovnání se objekty vytisknutými za atmosférického tlaku $101,7 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$.) Lze konstatovat, že žádný z předmětů tohoto limitu nedosáhl a 3D tiskárna tak předčila očekávání, jelikož ve všech deseti případech se rozdíl ve hmotnosti pohyboval v intervalu $\langle 0,35\% - 4,37\% \rangle$.

V budoucím výzkumu by bylo vhodné kvantifikovat náročnost samotného procesu od 3D skenování až po dokončení objektu, zaměřit se na hyperbarické prostředí s výrazně vyšší hodnotou přetlaku. Zkoumat jednotlivé mechanické a strukturální vlastnosti (proměnlivost pevnosti v tahu vlivem hyperbarického prostředí, hustotu, mez tepelné deformace). Dále limity 3D tiskárny a jejich komponent vůbec provést suchý tisk v prostředí s vyšší relativní vlhkostí než 60%.

Z praktického hlediska, existuje předpoklad, že by 3D tiskárna by mohla vytisknout funkční ochranou masku pro potřeby improvizované ochrany, či jiný předmět podobného charakteru. Obecně předměty, které kladou vysoký nárok na kohezi. Na míru vytvořený design vycházející z individuálních odlišností lidského těla může značit zlepšit přilnavost takového objektu. To vše v atypických podmínkách. V neposlední řadě je možné předpokládat, že 3D tisk má významný potenciál revolučním způsobem změnit způsob tvorby materiálních zásob v úkrytech, jelikož předmět potřebný v danou chvíli bude možné zkrátka vytvořit (ať už 3D digitalizací nebo jednoduše vymodelovat a následně vytisknout). 3D tisk je velmi perspektivní technologií a zaslouží pozornost i v rámci samotné ochrany obyvatelstva. V současné době pak zejména odbornou vědeckou pozornost.

Hlubší zkoumání této problematiky je nutné, avšak dle výsledků se jeví jako smysluplné.

SEZNAM ZDROJŮ

LEGISLATIVNÍ

- [1] Vyhláška č. 380/2002 Sb., Vyhláška Ministerstva vnitra k přípravě a provádění úkolů ochrany obyvatelstva In: Sběrka zákonů. 22.08.2002.
- [2] Zákon č. 239/2000 Sb., Zákon o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů. In: Sběrka zákonů. 09.08.2000
- [3] Zákon č. 539/1992 Sb., Zákon o puncovníctví a zkoušení drahých kovů (puncovní zákon) In: Sběrka zákonů. 31.12.1992

LITERÁRNÍ

- [4] BERNIER, Samuel, Bertier LUYT a Tatiana REINHARD. Design for 3D Printing: Scanning, Creating, Editing, Remixing, and Making in Three Dimensions. Kanada: Maker Media, 2015. ISBN 978-1-4571-8736-0.
- [5] CANESSA, Enrique a . 2013. Low-cost 3d printing for science, education & sustainable development. Trieste: The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. ISBN 92-95003-489.
- [6] ČERMÁK, JAN. METODY 3D SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103850.
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY. Vedoucí práce ING. TOMÁŠ MARADA, PH.D.
- [7] DVOŘÁKOVÁ, Zuzana a Zbyněk SVOZIL. 2005. Potápění: základy potápění, výcvik a vybavení, potápěčské sporty. 1. vyd. Praha: Grada, 97 s., [8] s. barev. obr. příl. ISBN 80-247-1100-1.
- [8] FEYNMAN, Richard Phillips. Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady. Havlíčkův Brod: Fragment, 2000. ISBN 978-807-2004-058.
- [9] HASHMI, Saleem, Gilmar Ferreira BATALHA, C. J. VAN TYNE a B. S. YILBAS. Comprehensive Materials Processing. USA: Elsevier, 2014. ISBN 978-0080965321.
- [10] HENDL, Jan. Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat. Páté, rozšířené vydání. Praha: Portál, 2015. ISBN 978-80-262-0981-2.

- [11] HORÁK, Rudolf et al. Průvodce krizovým řízením pro veřejnou správu. 1. vyd. Praha : Linde, 2004. 407 s. ISBN 80-7201-471-4.
- [12] HORÁK, Zdeněk; KRUPKA, František. Fyzika. Příručka pro vysoké školy technického směru. 3.. vyd. Praha : SNTL/ALFA, 1981. 04-017-81.
- [13] MICHALISKO, Jan. Využití 3d skenování pro přípravu obrábění odlitků součástí parních turbín. BRNO: 2012. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [14] MILLER, James Woodell a Ian G. KOBLICK. Living and working in the sea. New York: Van Nostrand Reinhold, c1984. ISBN 978-044-2260-842.
- [15] VÍTEK, Antonín a Petr LÁLA. Malá encyklopedie kosmonautiky. 1982. Praha: Mladá fronta, 1982. ISBN 23-079-82.

ELETRONICKÉ

- [16] 3D Printing In Zero Gravity Experiment. *Madeinspace.us*[online]. USA: Madeinspace, 2015 [cit. 2016-09-18]. Dostupné z: <http://madeinspace.us/projects/3dp>
- [17] 3dprintingindustry In: 3dprintingindustry.com[online]. USA: © 3D Printing Industry, 2016 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/EDekpE>
- [18] *Adafruit.com: Adafruit TSL2561 Digital Luminosity/Lux/Light Sensor Breakout* [online]. USA: Adafruit®, 2014 [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/970x728/439-00.jpg>
- [19] ALICI, Marco. *Parametric Flexible Coupling* [online]. In: . USA: MakerBot Industries, 2013 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:44078>
- [20] Apparatus and method for creating three-dimensional objects. USA. US5121329 A. Uděleno 1992. Zapsáno 1989. Dostupné také z: <http://www.google.de/patents/US5121329>
- [21] ARMSTRONG, James. Cube. In: *3dprinterwiki: Calibration And Test STL Files* [online]. USA: James, Jetguy, 2017 [cit. 2017-06-16]. Dostupné z: http://3dprinterwiki.info/wp-content/uploads/2017/01/Cube_Small.zip
- [22] BEĎÁŇOVÁ, Iveta., VEČEREK, Vladimír. Základy statistiky: pro studující veterinární medicíny a farmacie[online]. Brno, 2007 [cit. 20.7.2017]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/stat/FVL/Skripta.pdf>

- [23] BERNARDINI, Fausto. and RUSHMEIER, Holly. (2002), The 3D Model Acquisition Pipeline. *Computer Graphics Forum*, 21: 149–172. doi:10.1111/1467-8659.00574 [cit. 2016-08-22]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-8659.00574/abstract;jsessionid=C27B8FEA5EDD0FE5C3C7BA7F09580D5F.f02t01>
- [24] BEYERSTEIN, Gary. *Ommercial Diving: Surface-Mixed Gas, Sur-D-O2, Bell Bounce, Saturation*. [online]. USA, 2006 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: http://archive.rubicon-foundation.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/4661/SI_2006_11.pdf?sequence=1
- [25] BRASTAVICEANU, Daniel. *3D printer Calibration Matrix* [online]. In: . USA: MakerBot Industries, 2013 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:165389>
- [26] CAPABILITIES & SERVICES. *SpaceX.com* [online]. USA: SpaceX, 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.spacex.com/about/capabilities>
- [27] CAS číslo: 125051-32-3. In: Eurochem.cz: Katalog nebezpečných chemických látek. [online]. ČR: eurochem.cz, 2016 [cit. 2016-08-22]. Dostupné z: <https://goo.gl/vg56br>
- [28] *CBRN defense: hemical, biological, radiological and nuclear defense* [online]. USA: wikipedia.org, 2014 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/CBRN_defense
- [29] CRUMP, Steven Scott. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. 1989. USA. US 5121329 A. Zapsáno 1989.
- [30] *ČOS 151006* [online]. ČR: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2010 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.oos-data.army.cz/cos/cos/151006.pdf> Dostupné z <http://www.absolutegeometries.com/3D-Scanning.html>

- [32] DYBAŁA, Bogdan, Tomasz BORATYŃSKI a Jacek CZAJKA. Mechatronika Modul 9: Rychlé vytváření prototypů. *Tu-chemnitz.de* [online]. Poland: University of Wroclaw, 2008 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/forschung/verbundprojekte/minos/cz/download/Webs-eite/Modul%209/loesungsbuch.pdf>
- [33] ELUC. Oxidačně-redukční reakce, polymerace, substituční reakce. In: Eluc.kr-olomoucky.cz: ELEKTRONICKÁ UČEBNÍČ [online]. Olomoucký kraj: eluc.kr-olomoucky.cz, 2016 [cit. 2016-08-22]. Dostupné z: <https://goo.gl/yK6pzd>
- [34] HESTON, Stephen. *Flexible Octopus* [online]. In: . USA: MakerBot Industries, 2013 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:159217>
- [35] HUGHES, Daniel. *Echo | 3 tone whistle* [online]. In: . USA: MakerBot Industries, 2015 [cit. 2017-06-14]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:1192426>
- [36] JAMBOR, Patrik. Úkryt civilní ochrany Parukářka – Bezovka. In: <http://fortifikace.cz/> [online]. ČR: © Fortifikace.cz, 2016 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/dgqE55>
- [37] KADLEC, Martin. HB10. In: *Drive.google.com* [online]. Česká republika: <https://drive.google.com>, 2017 [cit. 2017-07-01]. Dostupné z: <https://goo.gl/Fw4r4B>
- [38] KADLEC, Martin. HB9. In: *Drive.google.com* [online]. Česká republika: <https://drive.google.com>, 2017 [cit. 2017-07-01]. Dostupné z: <https://goo.gl/KF3wSM>
- [39] KUBATOVA, Senta a NOVÁK Josef. *Wikiskripta: Stavová rovnice plynů* [online]. 2015, 2015 [cit. 2016-11-08]. ISSN 1804-6517. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Stavov%C3%A1_rovnic_plyn%C5%AF
- [40] LESÁK, Stanislav. NÁVOD K OBSLUZE Tsacale. *Profivahy.cz* [online]. Česká republika: LESAK, 2017 [cit. 2017-06-11]. Dostupné z: https://www.profivahy.cz/fotky506/fotov/_ps_1170Tscale-NHB.pdf
- [41] LÍZNER, Martin. Trezor-hw-master: cover-up. In: *Github.com* [online]. USA: GitHub, 2016 [cit. 2017-06-16]. Dostupné z: <https://github.com/trezor/trezor-hw/tree/master/case>
- [42] MADE IN SPACE a NASA HB. Wrench. In: ERICKSON, Kristen a Beth BECK. *Nasa3d.arc.nasa.gov* [online]. USA: Made In Space, Inc.; NASA MSFC, 2015 [cit. 2017-06-19]. Dostupné z: <https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/wrench-mis>

- [43] MAKE. *Make: Rook - 2015 3D Printer Shoot Out Test Models* [online]. In: . USA: MakerBot Industries, 2014 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:533652>
- [44] *Makel* [online]. Turecko: Makel, 2013 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://www.makelteknoloji.com>
- [45] MICHALISKO, Jan. Využití 3d skenování pro přípravu obrábění odlitek součástí parních turbín. BRNO: 2012. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [46] NEEMO. Nasa.gov [online]. USA: © NASA, 2016 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/EA5XA6>
- [47] *Photo-glyph recording*. USA. US2775758 A. Uděleno 1956. Zapsáno 1951. Dostupné také z: <https://www.google.ch/patents/US2775758>
- [48] Photopolymer. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-08-22]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photopolymer>
- [49] Photopolymer.com [online]. USA: © Savla Associates, 2014 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/huwFjH>
- [50] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. Základy 3D tisku [online]. 2014. ČR: (c) Prusa Research, 2014 [cit. 2015-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/VRETnH>
- [51] REDWOOD, Ben 3dhubs.com: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts#introduction> [online]. ©2017, 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts#introduction>
- [52] Reverse_engineering. 2001-. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering
- [53] Steven Scott Crump. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/4mWOIu>
- [54] Sebeochrana obyvatelstva ukrytím: Metodická pomůcka pro orgány státní správy, územní samosprávy, právnické osoby a podnikající fyzické osoby [online]. 2001. Praha: Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2001 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/MuCTQ9>

- [55] Selective laser sintering. In: Wikipedia: the free encyclopedia[online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/BlyyYf>
- [56] SLA-1 [online]. USA: 3DR Holdings, LLC, 2016 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/dF79dB>
- [57] Stereolithography. In: Wikipedia: the free encyclopedia[online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-16 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/l9BQxa>
- [58] Stereolitografie. In: 3d-tisk.cz: Aditivní výroba a Rapid Prototyping [online]. ČR: © Vydavatelství Nová média, s. r. o., 2014 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/aOckh8>
- [59] Summary Report on Phase I Results From the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission, Volume I: NASA/TP—2016–219101. *Nasa.gov* [online]. USA: NASA, 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160008972.pdf>
- [60] Validating Isotropy in SLA 3D Printing. *Formlabs.com* [online]. USA: Formlabs, 2016 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://formlabs.com/de/blog/isotropy-in-SLA-3D-printing/>
- [61] VLASOV, Denis. *SLA test model* [online]. In: . USA: MakerBot Industries, 2015 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:1219068>
- [62] What's the Difference Between Stereolithography and Selective Laser Sintering? In: <http://machinedesign.com/>[online]. USA: © Penton, 2015 [cit. 2016-08-19]. Dostupné z: <https://goo.gl/VU6VIk>
- [63] WHITLEY, Daniel a Sompop BENCHARIT. Digital Implantology with Desktop 3D Printing. In: *Formlabs.com* [online]. USA: Formlabs, 2017 [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: https://formlabs.com/media/upload/Digital-Implantology.pdf?utm_medium=email&utm_campaign=Content%20Download&utm_source=direct&mkt_tok=eyJpIjoiTVdFd05tRmpNVGc0WWpkaCIsInQiOiJSbDhlSDNsVklrTEREbFh0akw1RDA0Z3FaRG5Icklod2VTQVRsNzV3cmFHcFRJOTlEMFk0V1R1QkVvaFwveVdRQTJlQ0RiOEIEdHVcL2pPaE5ncW84dnduVGR0RFY1c3Zjd1I2Y245Qm1vNDhtZEZpbjNQXC9ObnpocGgrc0NXUVJsNSJ9
- [64] ZENOBI, Giacomo. *UV Box Assistant* [online]. In: . USA: MakerBot Industries, 2017 [cit. 2017-06-14]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:2377046>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Nákres zařízení pro „photo-glyph recording“ (patent US2775758 A, 1956)	13
Obrázek 2: Jedny z prvních objektů vyrobených Muncienem a Kodamou. (Hashmi, 2014)	14
Obrázek 3 SLA-1 byl první 3D tiskárnou vynalezenou Hullem. (3DR Holdings, 2016)	14
Obrázek 4 Nákres FDM dle Crumpova patentu (patent US 5121329 A, 1992).....	15
Obrázek 5 schéma znázorňující SLS (3dprintingindustry, 2016).....	17
Obrázek 6 schéma znázorňující SLA (3dprintingindustry, 2016)	18
Obrázek 7 schéma znázorňující DLP (3dprintingindustry, 2016)	19
Obrázek 8 schéma znázorňující FDM / FFF (3dprintingindustry, 2016)	20
Obrázek 9 - 3D model vrtulníku Bell 222 v programu Netfabb (vlastní archiv, 2016).....	24
Obrázek 10 – Dodatečné vytvrzování objektů pomocí UV světla (vlastní archiv, 2017).....	26
Obrázek 11 - ilustrativní nákres fotopolymerizace (Photopolymer, 2016)	27
Obrázek 12 - komplexní stavba molekuly bis(h5cyclopentadienyl)-bis[2,6-difluor-3-(pyrrol-1-yl)fenyl]titanu (eurochem, 2016)	28
Obrázek 13 – 3D tiskárna umožňující 3D tisk v prostředí mikrogravitace (NASA, 2016)	32
Obrázek 14 – vyvíjené zařízení pro 3D tisk ve vakuu (Madeinspace, 2015).	33
Obrázek 15 – Taxonomie 3D skenerů (Čermák, 2015)	34
Obrázek 16- NASA projekt Neemo (NASA, 2016)	37
Obrázek 17 Úkryt civilní ochrany Parukářka (Jambor , 2008)	38
Obrázek 18– 3D model V _A (vlastní archiv, 2017)	44
Obrázek 19 – 3D model HB1 (vlastní archiv, 2017).....	46
Obrázek 20– 3D model HB2 (vlastní archiv, 2017).....	47
Obrázek 21– 3D model HB3 (vlastní archiv, 2017).....	48
Obrázek 22– 3D model HB4 (vlastní archiv, 2017).....	49
Obrázek 23– 3D model HB5 (vlastní archiv, 2017).....	50
Obrázek 24– 3D model HB6 (vlastní archiv, 2017).....	51
Obrázek 25– 3D model HB7 (vlastní archiv, 2017).....	52
Obrázek 26– 3D model HB8 (vlastní archiv, 2017).....	53
Obrázek 27– 3D model HB9 (vlastní archiv, 2017).....	54
Obrázek 28– 3D model HB10 – bez podpor (vlastní archiv, 2017)	55
Obrázek 29 – demonstrativní proces 3D skenování v prostředí programu 3D Sense (vlastní archiv)	61
Obrázek 30 – Výstupní opravený .STL soubor z programu MashLab (vlastní archiv)	62
Obrázek 31 – Pravidlo “vrchol k vrcholu” - Aby bylo pravidlo „vrchol-k-vrcholu“ splněno, trojúhelník 1 by měl být	62
Obrázek 32 – Rozhraní a log Nano DLP (vlastní archiv).....	63
Obrázek 33 -Improvizovaná ochranná maska s označením „HB10“ včetně podpor (vlastní archiv)	65
Obrázek 34 – UV Box Assistant (Zenobi, 2017)	66

Obrázek 35 profil kalibračního ponoru (vlastní archiv)	67
Obrázek 36 – Data kalibračního ponoru programu „HT communication tool“ (vlastní archiv)	68
Obrázek 37 – HB8 - anomálie (vlastní archiv).....	81
Obrázek 38 –TSL2561 lux sensor (Adafruit; 2014).....	81

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Relativní nepřesnost měření; Variační koeficient A a Variační koeficient B	79
Graf 2 – Relativní diference hmotnosti	80
Graf 3 – absolutní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DBLK01-DL-FIRM“; Graf 4 - relativní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DBLK01-DL-FIRM“	83
Graf 5 – absolutní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DCL01-UV-HARD“; Graf 6 - relativní četnost objektů vytisknutých z materiálu „BR3DCL01-UV-HARD“	83

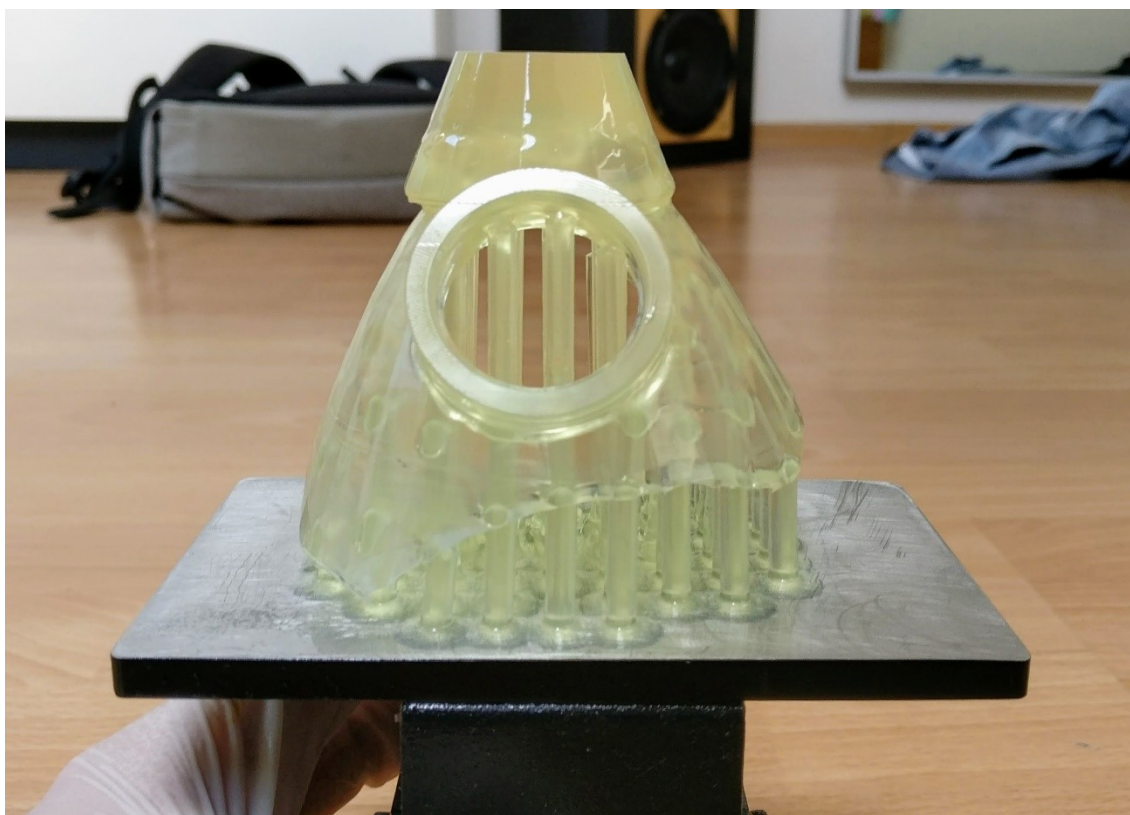
SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – porovnání technologie 3D tisku SLA, SLS a FDM (Redwood, 2016)	21
Tabulka 2– Technické parametry jednotlivých druhů Daylight resinu (Photocentric3d, 2016)....	29
Tabulka 3– Technické parametry jednotlivých druhů UV resinu (Photocentric3d, 2016)	30
Tabulka 4 – parametry tiskárny (Madeinspace, 2015)	32
Tabulka 5 – specifikace 3D modelu V_A	44
Tabulka 6 – značení fyzických objektů – vědecké otázky V_A vycházejících z 3D modelu V_{A1}	45
Tabulka 7 – specifikace 3D modelu HB1	46
Tabulka 8 – specifikace 3D modelu HB2	47
Tabulka 9 – specifikace 3D modelu HB3	48
Tabulka 10– specifikace 3D modelu HB4	49
Tabulka 11– specifikace 3D modelu HB5	50
Tabulka 12– specifikace 3D modelu HB6	51
Tabulka 13– specifikace 3D modelu HB7	52
Tabulka 14– specifikace 3D modelu HB8	53
Tabulka 15– specifikace 3D modelu HB9	54
Tabulka 16– specifikace 3D modelu HB10 s podporami	55
Tabulka 17 – značení objektů pro potřeby hypotézy H_B , modely HB1-HB10 a z nich vycházející fyzické objekty	56
Tabulka 18 – parametry váhy (Lesák, 2017).....	57
Tabulka 19 – specifikace skeneru (vlastní archiv)	61
Tabulka 20 specifikaci tlakoměru (vlastní archiv – manuál výrobce).....	68
Tabulka 21 – parametry kompresoru MATRIX ac 2000-25 (vlastní archiv – manuál výrobce)....	69
Tabulka 22 – Výsledky měření HB1	75
Tabulka 23 – Výsledky měření HB2	75
Tabulka 24 – Výsledky měření HB3	76
Tabulka 25 – Výsledky měření HB4	76
Tabulka 26 – Výsledky měření HB5	76
Tabulka 27 – Výsledky měření HB6	77
Tabulka 28 – Výsledky měření HB7	77
Tabulka 29 – Výsledky měření HB8	77
Tabulka 30 – Výsledky měření HB9	78
Tabulka 31 – Výsledky měření HB10	78
Tabulka 32 – Výsledky měření objektu z materiálu BR3DBLK01-DL-FIRM.....	82
Tabulka 33 – Výsledky měření objektu z materiálu BR3DCL01-UV-HARD.....	82

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č1 – Vybavení pro 3D skenování a 3D tisk
- Příloha č2 – Seznam QR kódů
- Příloha č3 – Výzkumné prostředí
- Příloha č4 – detail 3D tiskárny

PŘÍLOHA Č. 1 – VYBAVENÍ PRO 3D SKENOVÁNÍ A 3D TISK



Obrázek I – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)



Obrázek II – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)



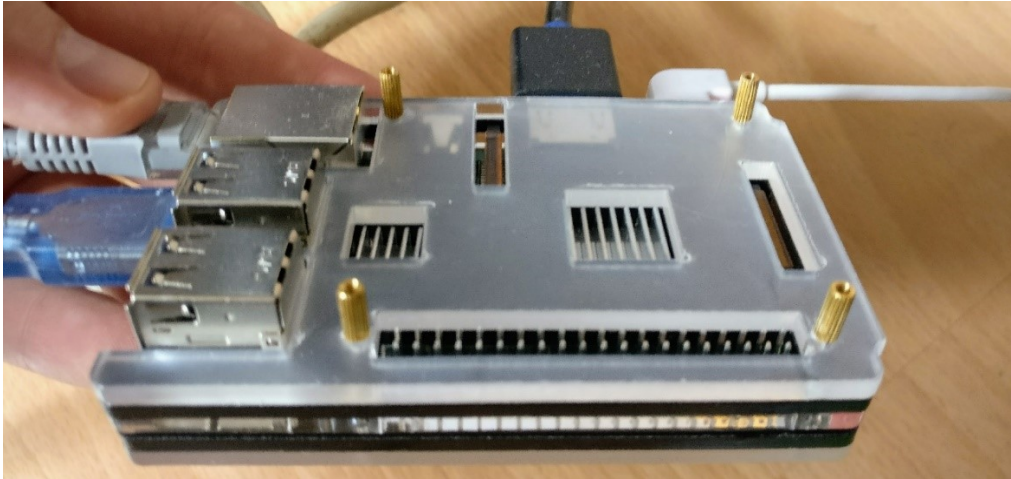
Obrázek III – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)



Obrázek IV – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)



Obrázek V – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)



Obrázek VI – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)














Obrázek VII – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)



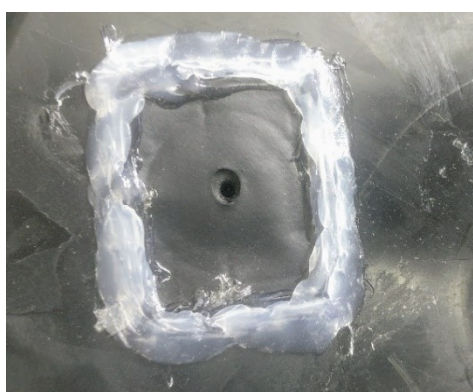
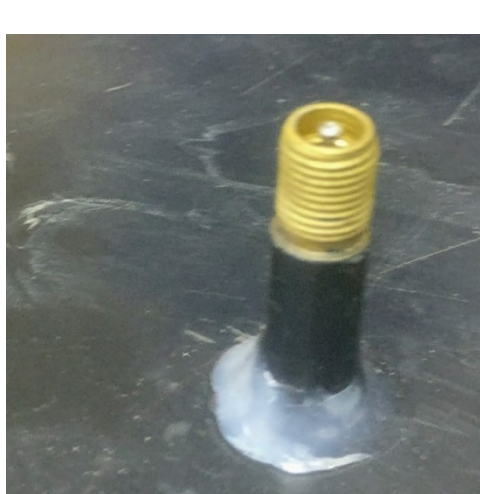
Obrázek VIII – vybavení pro 3D skenování a 3D tisk (vlastní archiv, 2017)

PŘÍLOHA Č. 2 – SENAM QR KÓDŮ

QR kod	Označení 3D modelu	Originální název	Reference
	VA1	„Echo 3 tone whistle“	(Hughes, 2015)
	HB1	„3D printer Calibration Matrix,“	(Brastaviceanu; 2014)
	HB2	„SLA test model“	(Vlasov; 2015)
	HB3	„Parametric Flexible Coupling“	(Alici; 2013)
	HB4	„Rook - 2015 3D Printer Shoot Out Test Models“	(Make, 2014)
	HB5	„Cube“	(Armstrong, 2017)

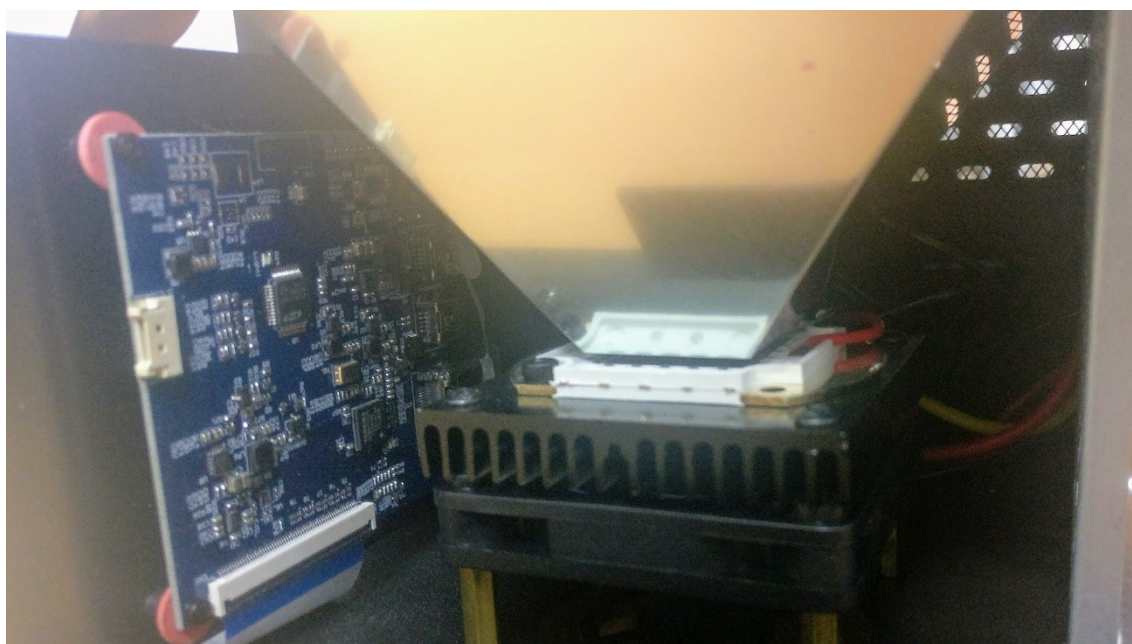
	HB6	„Flexible Octopus“	(Heston, 2013)
	HB7	„Trezor case“	(Lízner, 2016)
	HB8	„Wrench“	(NASA MSFC a MADE IN SPACE, 2015)
	HB9	„Redukce na 3D model HA1“	(vlastní archiv, 2017)
	HB10	„Improvizovaná ochranná maska“	(vlastní archiv, 2017)

PŘÍLOHA Č. 3 – VÝZKUMNÉ PROSTŘEDÍ

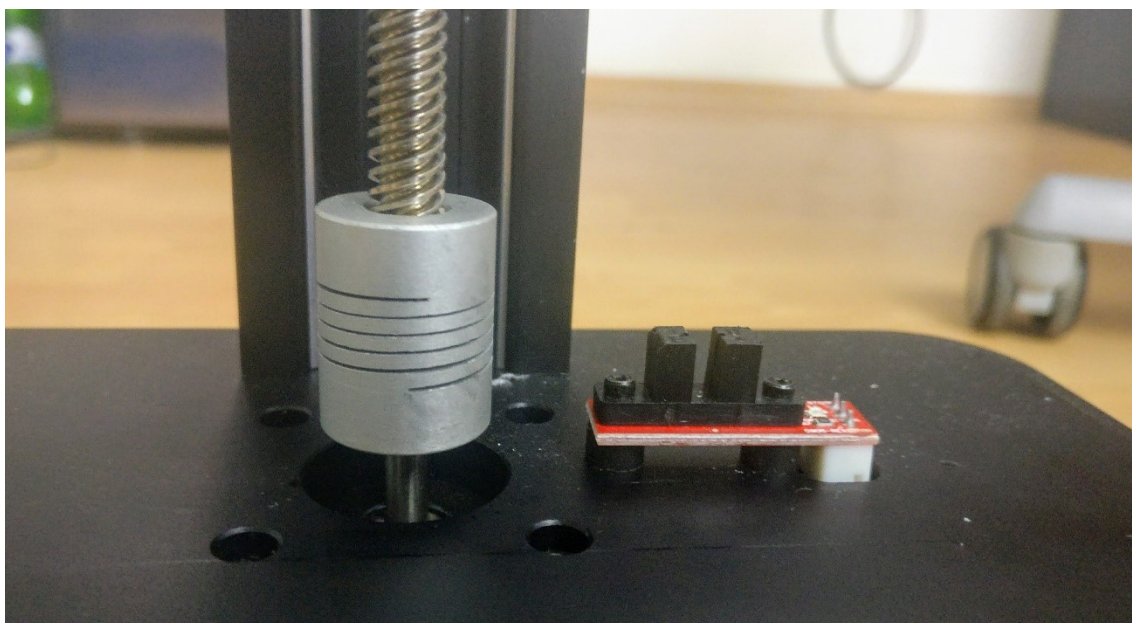


Obrázek IX, X, XI, XII, XIII, XIV – výzkumné prostředí (vlastní archiv, 2017)

PŘÍLOHA Č. 4 – DETAIL 3D TISKÁRNY



Obrázek XV – detail 3D tiskárny (vlastní archiv, 2017)



Obrázek XVI – detail 3D tiskárny (vlastní archiv, 2017)

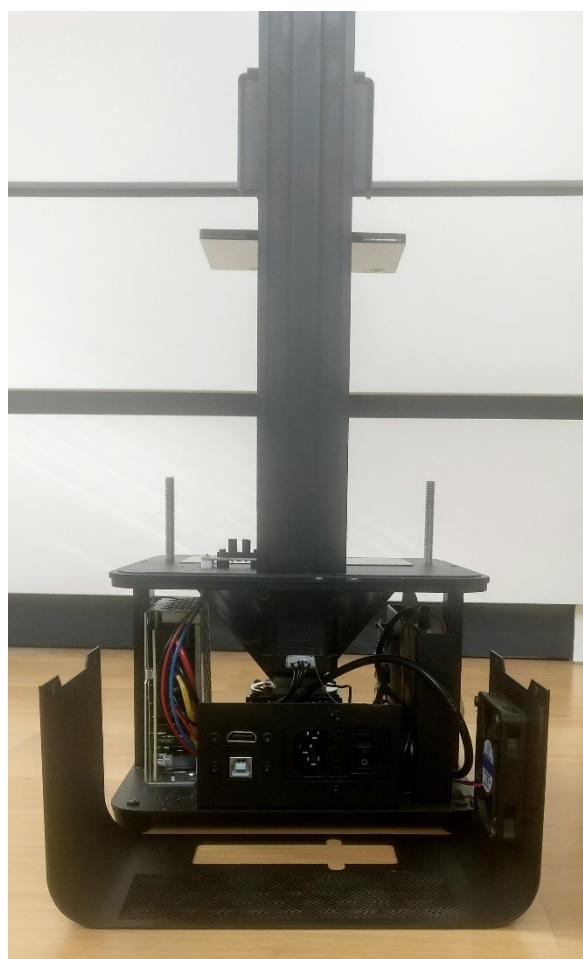
XII



XIII



XIX



Obrázek XVII, XVIII, XIX – detail 3D tiskárny (vlastní archiv, 2017)

VIII