

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Technologické možnosti 3D tisku metodou DLP

Technological possibilities of 3D printing by DLP method

AUTOR:

Jiřina Turnovcová

STUDIJNÍ PROGRAM:

Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. Libor Beránek, Ph.D.

**PRAHA 2021**



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Turnovcová** Jméno: **Jiřina** Osobní číslo: **458471**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Technologické možnosti 3D tisku metodou DLP**

Název bakalářské práce anglicky:

**Technological possibilities of 3D printing by DLP method**

Pokyny pro vypracování:

Základní funkční principy vybraných technologií 3D tisku.  
Zkoušení přesnosti, zkušební artefakty pro 3D tisk metodou DLP/SLA.  
Návrh zkušebního artefaktu pro tiskárnu DPL.  
Vlastní realizace artefaktu a analýza výsledků.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**


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

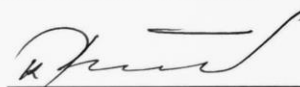
Datum zadání bakalářské práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.01.2021**

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

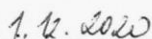
  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studentky

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce. Hlavně za trpělivost a čas, který byl ochoten věnovat této práci.

## Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na technologii 3D tisku, její základní principy a zkoušení přesnosti. Zabývá se především technologickými možnostmi 3D tisku metodou DLP (Digital Light Processing), jednou z nejnovějších technologií založenou na principu vytvrzování fotopolymeru UV zářením.

V práci je představeno zkoušení přesnosti na dvou odlišně orientovaných artefaktech při tisku, následně samotné tisknutí na 3D tiskárně a nakonec analýza pomocí počítačové tomografie. Analýza dat je provedena v prostřední VGStudio Max na obou srovnávaných artefaktech. V následném vyhodnocení jsou porovnány tvarové odlišnosti jednotlivých prvků artefaktu.

**Klíčová slova:** 3D tisk, aditivní výroba, zkušební artefakt, nedestruktivní zkoušení, výpočetní tomografie

## Annotation

This bachelor thesis is focused on 3D printing technology, it is basic principles and testing of accuracy. It deals primarily with the technological possibilities of 3D printing using the DLP (Digital Light Processing) method, one of the latest technologies based on the principle of curing the photopolymer by UV radiation.

The thesis introduces testing accuracy on two differently oriented artifacts during printing, then printing on a 3D printer and finally analysis using computed tomography. Data analysis is performed in the middle VGStudio Max on both compared artifacts. In the subsequent evaluation, the shape differences of the individual elements of the artifact are compared.

**Keywords:** 3D printing, additive manufacturing, test artifact, non-destructive testing, computed tomography

## Seznam použitých zkratek a symbolů

3D	Trojrozměrný
DLP	Digital Light Processing
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused deposition modeling
CAD	Počítačem podporované projektování
CDLP	Continuous Digital Light Processing
LED	Light Emitting Device
LCD	Liquid Crystal Display
MJ	Material Jetting
DOD	Drop on demand
BJ	Binder Jetting
PBF	Powder Bed Fusion
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
MJF	Multi Jet Fusion
SLM	Selective Laser Melting
DED	Directed Energy Deposition
CT	Výpočetní tomografie
mm	milimetr
UV	Ultrafialové záření
μm	mikrometr
W	Watt
nm	nanometr
kV	kilovolt
μA	mikroamper
ms	milisekunda
%	procento

# Obsah

1	Úvod .....	9
2	Výhody a nevýhody 3D tisku .....	10
3	Vývoj aditivní technologie .....	12
4	Základní principy technologií 3D tisku .....	14
4.1	VAT photopolymerisation .....	15
4.2	Material Extrusion .....	16
4.3	Material Jetting (MJ) .....	17
4.4	Binder Jetting (BJ) .....	18
4.5	Powder Bed Fusion (PBF) .....	20
4.5.1	Selective laser sintering (SLS) .....	21
4.5.2	Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) .....	21
4.5.3	Electron Beam Melting (EBM) .....	22
4.5.4	Multi Jet Fusion (MJF) .....	22
4.6	Directed Energy Deposition (DED) .....	22
4.7	Sheet Lamination .....	23
5	Zkoušení přesnosti, zkušební artefakty pro 3D tisk metodou DLP/SLA .....	24
5.1	Rozlišení .....	24
5.2	Velikost pracovního prostoru .....	25
5.3	Kvalita povrchu .....	25
6	Zkušební artefakty pro 3D tisk .....	27
7	Vlastní realizace artefaktu .....	29
7.1	Návrh zkušebních artefaktů .....	29
7.2	Tisk artefaktu .....	32
7.3	Analýza artefaktu pomocí výpočetní tomografie .....	33
7.4	Analýza a zhodnocení výsledků .....	34
7.4.1	Analýza odchylek tvaru .....	35
7.4.2	Sloty .....	37
7.4.3	Šachovnice .....	39
7.4.4	Polokoule .....	41
7.4.5	Dutá polokoule a tloušťka stěny .....	42
7.4.6	Piny a otvory .....	43
7.4.7	Drážky .....	46
7.4.8	Kříž .....	49

7.4.9	Prohlubující se šestiúhelík .....	50
7.4.10	Zkouška pro svislou plochu .....	51
7.4.11	Zvlněná plocha .....	53
7.4.12	Overhang.....	53
7.4.13	Válec a ostatní prvky .....	54
7.4.14	Chyba tvaru celkového artefaktu .....	56
8	Závěr.....	57
9	Zdroje .....	59
10	Seznam obrázků a tabulek .....	62
10.1	Seznam obrázků .....	62
10.2	Seznam tabulek.....	63



# 1 Úvod

V této bakalářské práci se budu zabývat technologickými možnostmi 3D tisku, se zaměřením na metodu DLP (Digital Light Processing), jednou z nejnovějších technologií založenou na principu vytvrzování fotopolymeru UV zářením jako je například stereolitografie (SLA).

3D tisk neboli aditivní technologie známá jako „additive manufacturing“ je definována jako proces vytvářející trojrozměrné objekty spojováním materiálů vrstvu po vrstvě a tím výrazně zjednodušující proces vytváření složitých 3D objektů. Všechny dostupné stroje pro aditivní výrobu používají přístup založený na vrstvách a hlavními způsoby, kterými se liší, jsou materiály, které lze použít, způsob vytváření vrstev a způsob propojení vrstev. Toto je určováno faktory, jako je přesnost konečné části plus její materiálové a mechanické vlastnosti. [1]



Obrázek 1: Aditivní technologie [8]

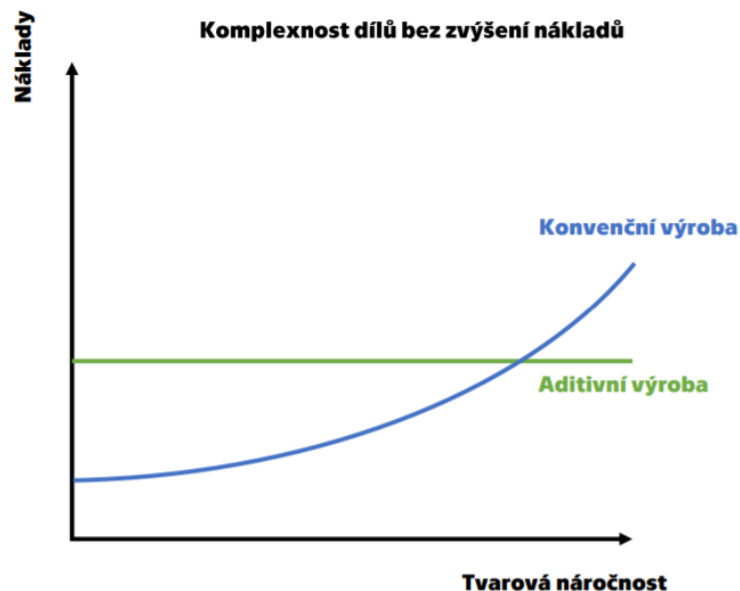
3D tisk si dnes ve světě výroby našel velmi specifické role v oblasti technologie, zdravotnictví, umění, stavebnictví ale i v domácnostech. Mnoho aspektů technologie je nyní běžných a přijato jak profesionály, tak běžnými uživateli. [19]

Bakalářská práce nejprve seznamuje o technologii 3D tisku. Jaké existují principy vybraných technologiích, jak probíhá zkoušení přesnosti a jaké se využívají zkušební artefakty pro 3D tisk metodou DLP/SLA. Druhá část je zaměřena na praktické navržení zkušebního artefaktu, vlastní realizaci a analýzu výsledků.

## 2 Výhody a nevýhody 3D tisku

Jednou z výhod aditivní výroby je rychlost, kterou mohou být vyrobeny díly v porovnání s tradičními výrobními postupy. Tam kde v minulosti mohlo trvat dny nebo dokonce týdny výroba prototypu, dnes to může být otázka několika hodin. Aditivní výrobu proto můžeme chápat jako způsob, jak efektivněji předvídat dobu výroby modelů, bez ohledu na to, jaké změny jsou prováděny během vývoje produktu na rozdíl od konvenčních metod, kde by se výrazně zvedly náklady a čas na výrobu. [1]

U aditivní výroby nám tvarová složitost a komplexnost dílů neovlivňuje náklady, kdežto u konvenčních metod nám s tvarovou náročností náklady rostou.



Obrázek 2: Závislost nákladů na tvarové náročnosti [10]

Aditivní výroba ve srovnání s tradičními výrobními procesy může výrazně snížit spotřebu energie tím, že se použije méně materiálu a eliminují se kroky ve výrobním procesu. Například výroba motoru LEAP od Snecma (Safran) a General Electric (GE) obsahuje palivové trysky tištěné laserovým slinováním. V roce 2018 se Mohammad Ehteshami, tehdejší vedoucí inženýr společnosti GE Aviation, rychle poznal, že jeho úspěch spočíval

v mnoha ohledech na labyrintových průchodech uvnitř špičky palivové trysky, která je navržena pro míchání tryskového paliva se vzduchem nejúčinnějším způsobem. [2,17]



*Obrázek 3: Palivová tryska (tištěná část uvnitř propíchnuté prstencové části vpravo) [17]*

Ale jakkoli to bylo elegantní, vnitřní geometrie špičky byla příliš složitá. Objekt velikosti vlašského ořechu, který obsahoval 14 propracovaných tekutinových průchodů. Konvenční výrobní proces svařil 20 dílů, zatímco aditivní výroba vyrobila jeden kus, který je o 25% lehčí, pětkrát odolnější a snižuje spalování paliva o 15%. Aditivní technologie také vytváří podstatně méně odpadu než konvenční metody. Namísto odstranění materiálu “přidává” vrstvu materiálu po vrstvě, takže se použije jen tolik materiálu, kolik je potřeba na samotný výrobek, případné podpěry a přídavky na obrábění. Tímto můžeme snížit materiálové náklady a ztráty až o 90 procent. [2,17]

### 3 Vývoj aditivní technologie

Za první náznaky vytváření 3D objektů můžeme považovat rok 1926, kdy za použití elektrického oblouku jako zdroje tepla vytvářeli objekty depozicí roztaveného kovu po vrstvách. Avšak první pokusy o 3D tisk byly uděleny Hideo Kodamovi v roce 1981 za jeho vývoj rychlých prototypových technik s použitím fotopolymerů. [4] O tři roky později, v roce 1984 Chuck Hull podal svůj vlastní patent na stereolitografický výrobní systém, ve kterém se vrstvy přidávali vytvrzováním fotopolymerů ultrafialovými lasery. Primární doplněk pana Hulla byl návrh a vývoj formátu STL (Stereolithography), nyní široce přijímaného a využívaného 3D tiskovým softwarem. Založil společnost 3D Systems Corporation a o rok později vydala první stereolitografický stroj SLA-1. [4]



Obrázek 4: Stereolitografický stroj SLA-1 [5]

V roce 1988 na univerzitě v Texasu byl udělen Carlu Deckardovi patent na technologii SLS, ve které jsou prášková zrna tavena laserem. O rok později S. Scott Crump podal patent na třetí z hlavních technologií 3D tisku "Fused Deposition Modeling" (FDM).

Do poloviny devadesátých let se začaly objevovat technologie kovového 3D tisku. Vznikly hlavní výrobci 3D tiskáren a CAD nástrojů. V Evropě byl založen první systém EOS "Stereos" pro průmyslové prototypy a výrobní aplikace 3D tisku. Jeho průmyslová kvalita je dnes uznávána po celém světě v technologii SLS pro plasty a kovy.

V roce 1992 byl udělen patent Stratasys na Fused Deposition Modeling (FDM) - technologii, kterou společnost drží dodnes, ale také proces používaný mnoha

základními stroji, který je dnes velmi využíváný. [4] Od roku 1993 do roku 1999 se objevili nové různé techniky. Na základě technologie inkoustového tisku společnosti MIT vytvořily model Z402, který vyráběl modely s použitím práškových materiálů ze škrobu, sádry a tekutého pojidla na bázi vody. Zároveň byly stále více vyvíjeny CAD nástroje pro 3D tisk, například vytvoření Sanders Prototype (nyní známého jako Solidscape), která zavádí vysoce přesný systém výroby polymerů s rozpustnými nosnými konstrukcemi. [4,6]

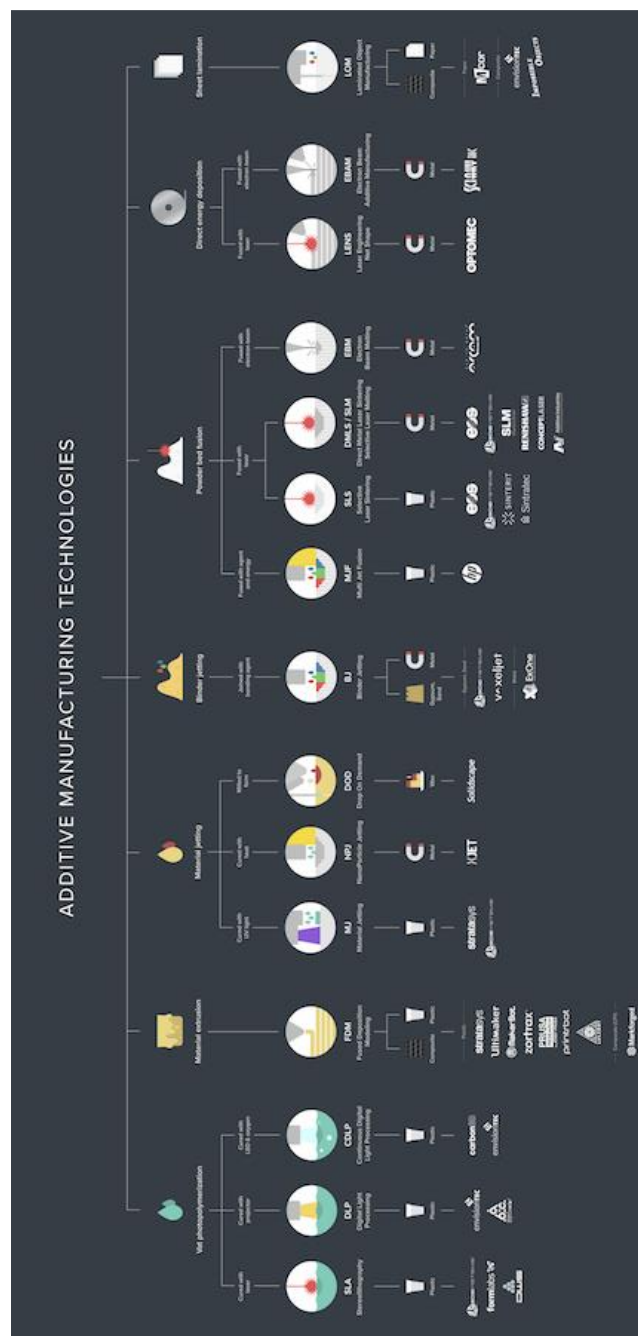
V roce 2000 se objevila první 3D vytištěná pracovní ledvina a rok 2004 byl rokem zahájení projektu RepRap, jehož cílem bylo vytvořit levnou 3D tiskárnu schopnou replikovat samo sebe. [4] První stroj SLS se stal v roce 2006 komerčně životaschopným, což otevřelo dveře výrobě průmyslových dílů na objednávku. Byl vytvořen stroj pro tisk, který dokázal tisknout v několika materiálech, které umožnily výrobu jedné části v různých verzích a s různými vlastnostmi materiálu. V roce 2008 dosáhl 3D tisk ještě větší mediální přítomnosti díky první 3D tištěné protetické končetině, která obsahovala všechny části biologické končetiny. V současné době je výroba lékařské protézy a ortézy stále levnější a extrémně rychlejší. [7]

Rok 2009 byl rokem, kdy se patenty FDM dostaly na veřejnost a otevřely tak cestu široké vlně inovací v 3D tiskárnách FDM, poklesu ceny desktopových 3D tiskáren a následnou viditelnost. V roce 2010 se začaly používat kovové materiály na části strojů a o rok později začala Cornellova univerzita stavět 3D tiskárnu potravin. Na první pohled se to může zdát trochu triviální, ale NASA zkoumala, jak mohou kosmonauté tisknout potravu do vesmíru a v roce 2014 přinesla 3D tiskárnu, aby vytvořila první 3D vytištěný objekt mimo zemi. V roce 2015 Boeing ve svých letadlech použilo více než 20 000 3D vytištěných částí. Začalo se tisknout z nových materiálů pomocí technologie Carbon 3D CLIP, která je na trhu od roku 2016 a která vytiskne silné objekty z mechanické pryskyřice v neobyčejné rychlosti. Laboratoř Daniela Kellyho dále oznámila schopnost tisknout kosti. [4]

Nyní už je na trhu 3D tiskárna (Photonic Professional GT), která může vytvářet objekty, které nejsou širší než lidské vlasy. [7]

## 4 Základní principy technologií 3D tisku

Volba nejvhodnějšího procesu aditivní výroby pro konkrétní aplikaci může být obtížná. V současné době je velmi rozsáhlá nabídka dostupných technologií a materiálů, což znamená, že mohou být použitelné, ale každá z nich se liší rozměrovou přesností, potřebou povrchových úprav a postprocesním požadavkům. Na obrázku můžeme vidět přehled technologií 3D tisku, které jsou rozděleny do sedmi kategorií. [14]

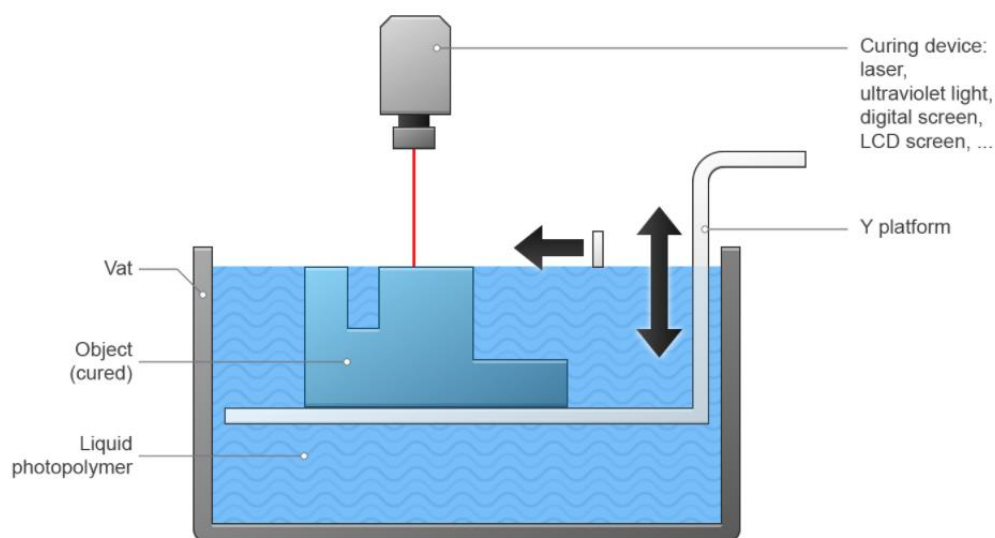


Obrázek 5: Přehled technologií 3D tisku [14]

## 4.1 VAT photopolymerisation

Využívá nádrž s kapalnou fotopolymerní pryskyřicí, z níž je model konstruován přidáváním vrstvy po vrstvě. Pryskyřice se vytvrzuje pomocí procesu fotopolymerizace s využitím UV světla. Plošina s objektem se pokaždé vrstvě sníží dolů o tloušťku vrstvy. Po dokončení je nádrž s pryskyřicí vypuštěna a předmět je vyjmut. [11]

VAT photopolymerisation je veškerý 3D tisk založený na vytvrzování kapalně fotopolymerní pryskyřice. Všechny ostatní názvy, například SLA, DLP nebo CDLP jsou podkategoriemi této technologie. [8]



Obrázek 6: VAT Photopolymerisation [25]

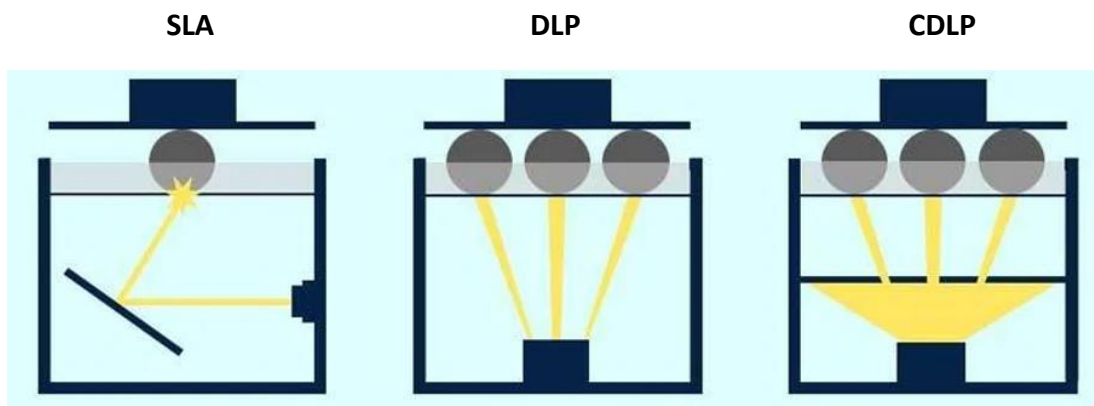
**SLA** proces má vysokou úroveň přesnosti a dobrou povrchovou úpravu, ale často vyžaduje podpůrné struktury a dodatečné vytvrzení, aby byla součást dostatečně silná pro strukturální použití. Lze dosáhnout procesu fotopolymerizace pomocí jediného laseru a optiky.

Hlavní výhodou této metody je vyšší přesnost a lepší kvalita tisku, protože přesný pohyb a malá velikost laseru umožňují jemnější detaily a rozlišení. Tato vylepšená kvalita přichází za cenu rychlosti tisku, protože vytvrzení každé vrstvy může být časově náročnější. [8]

**DLP proces (Digital light processing)** používá jiný zdroj UV světla. Místo laserů mají DLP tiskárny UV projektory, kde je obraz každé vrstvy složen ze čtvercových pixelů. Průřezy každé vrstvy se promítnou najednou a vytvrdí vše ve vrstvě najednou. Tím se

ztratí rozlišení ve srovnání s SLA a použité projektory mohou být objemné a drahé. Získá se však mnohem lepší rychlost tisku, protože lze vytvrdit celou vrstvu najednou. [8]

**CDLP (Continuous digital light processing)** je relativně nový proces a je možná největším zdrojem záměny. Zdrojem UV záření je levná LED dioda, která osvětluje vrstvu fotopolymeru a místa, která nemají být vytvrzována, jsou maskována LCD displejem. V zásadě to nahrazuje DLP projektor kompaktnější a levnější obrazovkou, na úkor rozlišení tisku a životnosti tiskárny. [8]

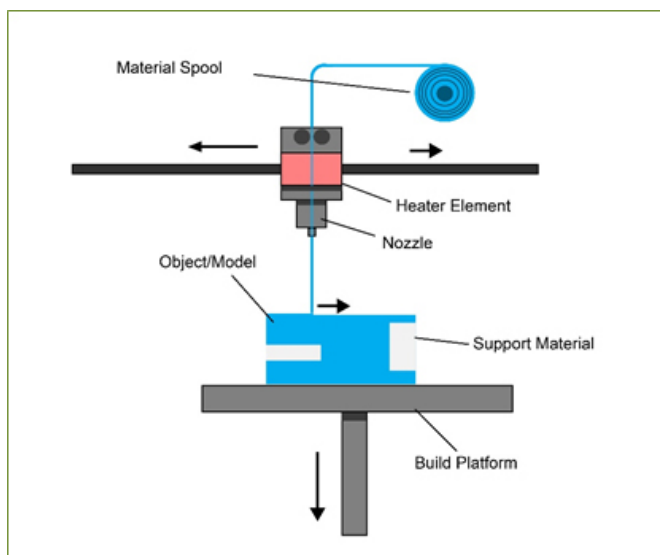


Obrázek 7: Srovnání technologií SLA, DLP, CDLP [8]

## 4.2 Material Extrusion

Technologií Material Extrusion má podkategorii FDM (Fused deposition modeling), která je nejrozšířenější používanou technologií. Materiál je tažen pomocí trysky, v níž je ohříván a následně nanesen vrstvou po vrstvě. Tryska se může pohybovat vodorovně a plošina se po každé nové vrstvě pohybuje svisle nahoru a dolů. Jedná se o běžně používanou techniku používanou na mnoha levných, domácích a hobby 3D tiskárnách. Proces má mnoho faktorů, které ovlivňují kvalitu konečného modelu, ale má velký potenciál a životaschopnost, pokud jsou tyto faktory úspěšně kontrolovány. Zatímco FDM je podobný všem ostatním procesům 3D tisku, protože vytváří vrstvu po vrstvě, liší se ve skutečnosti tím, že materiál je přidáván tryskou za konstantního tlaku a v nepřetržitém proudu. Tento tlak musí být udržován stabilní a konstantní rychlostí, aby bylo možné dosáhnout přesných výsledků. Vrstvy materiálu lze spojit pomocí regulace teploty nebo pomocí chemických látek. Materiál je do stroje často přidáván ve formě cívky, jak je znázorněno na obrázku. [11]





Obrázek 8: Material extrusion [11]

Mezi výhody procesu FDM patří použití snadno dostupného termoplastického materiálu, který umožňuje výrobu modelů s dobrými strukturálními vlastnostmi, které se blíží konečnému výrobnímu modelu. Proces však vyžaduje mnoho faktorů, které je třeba kontrolovat, aby bylo dosaženo vysoce kvalitního provedení. Tryska, která ukládá materiál, bude mít vždy poloměr, protože není možné vytvořit dokonale čtvercovou tryšku, což ovlivní konečnou kvalitu tištěného objektu. Přesnost a rychlost jsou ve srovnání s jinými procesy a kvalitou finálního modelu omezena na tloušťku trysek materiálu.

Jednou z metod následného zpracování ke zlepšení vizuálního vzhledu modelů je zlepšení propustnosti materiálu zvyšováním teploty nebo použitím pryskyřice. Stejně jako u většiny procesů následného zpracování souvisejících s teplem je pravděpodobné, že dojde ke smrštění, a je-li požadována vysoká tolerance, je třeba jej zohlednit.

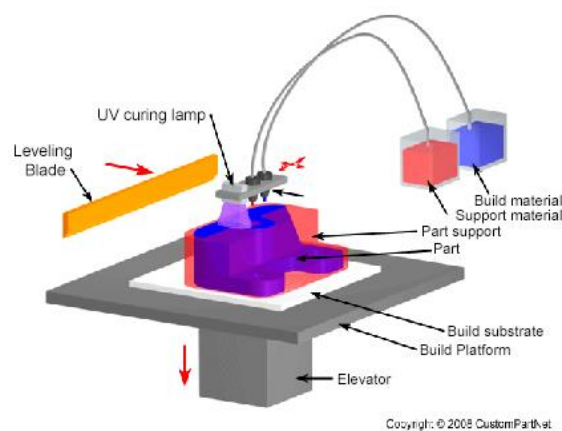
Z technologického hlediska můžeme zabránit deformacím sledováním teploty systému FDM a zvýšením adheze mezi částí a konstrukční plošinou. Tento proces 3D tisku je rychlý a nákladově efektivní způsob výroby plastových prototypů. [11]

#### 4.3 Material Jetting (MJ)

Material jetting (MJ) je jednou z nejrychlejších a nejpřesnějších technologií 3D tisku. Vytváří součásti pomocí kapiček kapalného fotopolymeru, které jsou vytvrzovány UV zářením. MJ je také docela podobný SLA, protože k vytvrzení pryskyřice používá zdroj

UV záření. Rozdíl je v tom, že 3D tiskárny MJ stříkají stovky drobných kapiček najednou, zatímco 3D tiskárny SLA obsahují celou vanu pryskyřice, která je selektivně (bodově) vytvrzována laserem. MJ vytváří díly s vysokou rozměrovou přesností s velmi jemným povrchem.

Kromě toho, že tato technologie umožňuje ukládání materiálu po celé ose X, poskytuje více tiskových hlav, díky kterým je k dispozici tisk více materiálů a široká škála materiálů. Hlavními nevýhodami technologií tryskání materiálu jsou vysoké náklady a křehké mechanické vlastnosti UV aktivovaných fotopolymerů. [8, 25]



Obrázek 9: Material Jetting [11]

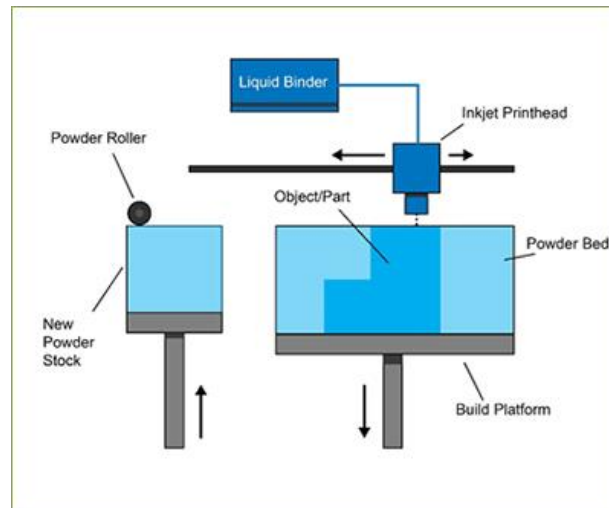
### Drop on demand (DOD)

Tato technologie je podkategorií MJ která ukládá materiál pouze bodově namísto souvislých čar a používá se obvykle pro viskózní kapalné materiály. Tyto tiskárny s technologií DOD používají dvě hlavy, jednu pro stavební materiál a podpurný materiál. Vzhledem ke své schopnosti tisknout viskózní kapalinu se používají výhradně k výrobě voskových forem pro odlévání, zejména při výrobě šperků. [9]

### 4.4 Binder Jetting (BJ)

Proces tryskání pojiva používá dva materiály: materiál na bázi prášku a pojivo. Pojivo působí jako lepidlo mezi práškovými vrstvami. Pojivo je obvykle v kapalné formě a stavební materiál v práškové formě. Tisková hlava se pohybuje vodorovně podél os x a y stroje a ukládá střídavé vrstvy stavebního materiálu a vazebného materiálu. Po každé

vrstvě se tištěný objekt posune dolů a nová vrstva prášku se nanese na platformu. Vzhledem k metodě vazby nejsou materiálové charakteristiky vždy vhodné pro konstrukční součásti a navzdory relativní rychlosti tisku může dodatečné následné zpracování celému procesu přidat značný čas. [11]



Obrázek 10: Binder Jetting [11]

Proces tryskání pojiva umožňuje barevný tisk a používá kov, polymery a keramické materiály. Proces je obecně rychlejší než ostatní a lze jej dále urychlit zvýšením počtu otvorů tiskové hlavy, které ukládají materiál. Přístup dvou materiálů umožňuje dosáhnout velkého počtu různých kombinací pojivo-prášek a různých mechanických vlastností konečného modelu změnou poměru a jednotlivých vlastností těchto dvou materiálů. Proces je proto vhodný pro situace, kdy vnitřní struktura materiálu musí mít určitou kvalitu. [11]

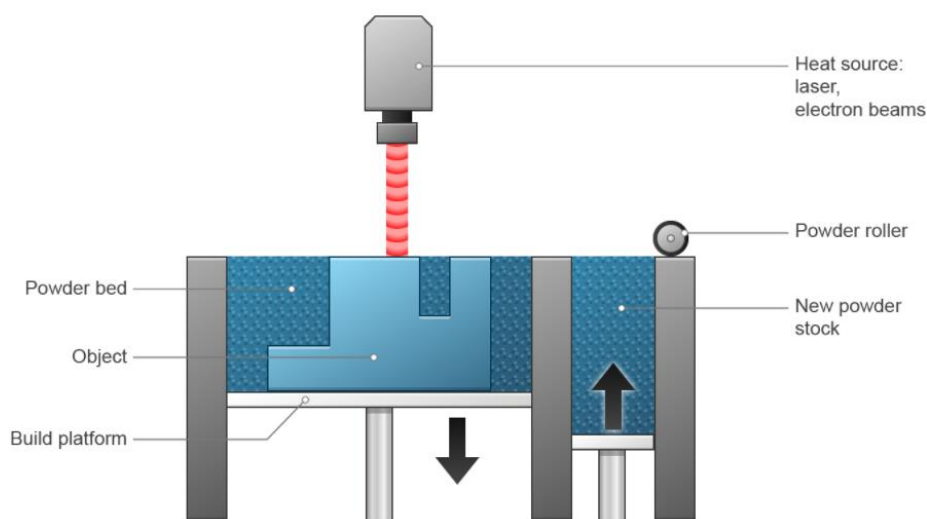
Celková doba procesu se prodlužuje, protože vyžaduje tuhnutí pojiva a část se často nechá vychladnout ve stroji, aby plně ztuhla, aby se dosáhlo vysoce kvalitní úpravy. Často je nutné dodatečné zpracování, aby byla součást pevnější a aby pojivový materiál měl lepší mechanické a strukturní vlastnosti. [11]

## 4.5 Powder Bed Fusion (PBF)

Proces Powder Bed Fusion zahrnuje následující běžně používané tiskové technologie:

Direct metal laser sintering (DMLS), Electron beam melting (EBM), Multi jet fusion (MJF), Selective laser melting (SLM) and Selective laser sintering (SLS). [11]

Technologie vytváří pevnou část s využitím tepelného zdroje, který indukuje fúzi (slinování nebo tavení) mezi částicemi plastového nebo kovového prášku vrstvu po vrstvě. Hlavní rozdíly technologií PBF jsou zdroje energie (například lasery nebo elektronový svazek) a prášky používané v procesu (plasty nebo kovy). Vrstva, obvykle o tloušťce 0,1 mm materiálu, se rozkládá po ploše, laser spojí první vrstvu nebo první průřez modelu a nová vrstva prášku je rozložena na předchozí vrstvu pomocí válečku. Proces se opakuje, dokud není vytvořen celý model, který je v nezpracovaném prášku. Část se vyjme, vyčistí a pak je připraven k použití nebo dalšímu zpracování.



Obrázek 11: Powder bed fusion [25]

Jak kovové, tak plastové části PBF mají typicky velmi vysokou pevnost, tuhost a velmi dobré mechanické vlastnosti, které jsou srovnatelné (nebo někdy dokonce lepší) než sypký materiál. Existuje široká škála způsobů post-zpracování, což znamená, že části PBF mohou mít velmi jemný povrch a z tohoto důvodu se často používají k výrobě konečných výrobků.

Omezení PBF se často soustřeďují kolem drsnosti povrchu a vnitřní porozity částí, které se vytvářejí v průběhu zpracování, smršťování a problémy spojené s manipulací a likvidací prášku, kde je velké riziko ohrožení na zdraví. [9]

#### 4.5.1 Selective laser sintering (SLS)

Výhodou procesu SLS je, že nevyžaduje žádnou další podpurnou strukturu, protože práškový materiál poskytuje adekvátní podporu modelu během celého procesu sestavení. Konstrukční platforma je v komoře s řízenou teplotou, kde je teplota obvykle o několik stupňů nižší než teplota tání materiálu, což snižuje závislost laseru na spojování vrstev dohromady. Komora je často naplněna dusíkem, aby se maximalizovala oxidace a konečná kvalita modelu. Některé stroje monitorují teplotu vrstvu po vrstvě a přizpůsobují výkon a výkon laseru, aby zlepšily kvalitu. Části SLS mají dobré, izotropní mechanické vlastnosti a činí je ideální pro funkční části a prototypy. SLS nevyžaduje žádnou podporu, takže lze snadno vyrobit návrhy složité geometrie. Výrobní kapacita SLS je vynikající pro malou až střední výrobu. [9]

#### 4.5.2 Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Selective Laser Melting (SLM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS) produkují součásti podobnou metodou jako SLS. Hlavní rozdíl je v tom, že SLM a DMLS se používají při výrobě kovových dílů. SLM dosahuje plné taveniny prášku, zatímco DMLS zahřeje prášek na téměř teplotu tání, dokud se chemicky nespojí. Ve srovnání s SLS je SLM často rychlejší, ale vyžaduje použití inertního plynu, má vyšší náklady na energii. Tento proces používá k rozložení nových vrstev prášku na předchozí vrstvy váleček. DMLS pracuje pouze se slitinami (slitiny niklu, Ti64 apod.), zatímco SLM může používat jednosložkové kovy, například hliník. Na rozdíl od SLS, SLM a DMLS vyžadují podpurné struktury, které kompenzují vysoké zbytkové napětí vzniklé během procesu výstavby. DMLS je nejznámější kovový proces 3D tisku s největší instalovanou základnou. [9,11]

### 4.5.3 Electron Beam Melting (EBM)

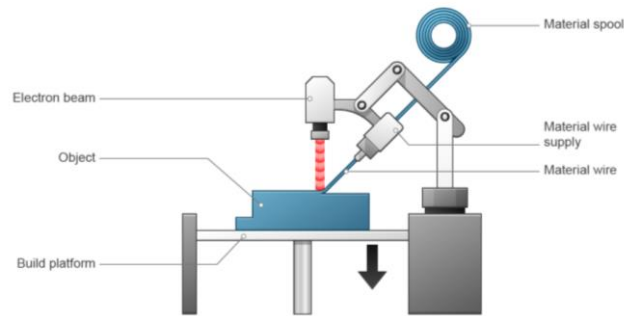
Tato technologie využívá elektronový paprsek k roztavení kovových prášků. EBM poskytuje modely s velmi dobrými pevnostními vlastnostmi díky rovnoměrnému rozložení teploty během fúze. Může vytvářet vrstvy rychleji než SLM a DMLS, avšak minimální velikost prvku, velikost částic prášku, tloušťka vrstvy a povrchová úprava jsou typicky nižší kvality. EBM také vyžaduje, aby byly díly vyráběny ve vakuu a proces může být použit pouze s vodivými materiály. Díky vysoké kvalitě a povrchové úpravě je tento proces vhodný pro výrobu vysoce standardních dílů používaných v letadlech a lékařských aplikacích. Tento proces nabízí řadu výhod oproti tradičním metodám vytváření implantátů, včetně protézy kyčelního dřívku. [11]

### 4.5.4 Multi Jet Fusion (MJF)

MJF je v podstatě kombinací technologií SLS a technologie tryskání. Část s tryskami pro inkoustové trysky prochází oblastí tisku a nanáší fixační prostředek na tenkou vrstvu plastového prášku. Současně je v blízkosti okraje součásti vytištěn prostředek, který zabraňuje slinování. Zdroj infračerveného záření pak přechází přes vrstvu a spéká oblasti, ve kterých byl fixační prostředek dávkován, zatímco zbývající část prášku zůstala nedotčena. Proces se opakuje, dokud nejsou všechny části dokončeny. [11]

### 4.6 Directed Energy Deposition (DED)

Jedná se o složitější tiskový proces běžně používaný k opravě nebo přidání dodatečných materiálů ke stávajícím komponentům. Typický stroj DED se skládá z trysky namontované na víceosém rameni, které nanáší roztavený materiál na určený povrch, kde ztuhne. Proces je v principu podobný Material extrusion, ale tryska se může pohybovat v několika směrech a není fixována na konkrétní osu. Materiál, který lze nanášet z jakéhokoli úhlu na víceosých strojích, se při nanášení taví laserovým nebo elektronovým paprskem. Tento postup lze použít s polymery, keramikou, ale obvykle se používá s kovy ve formě prášku nebo drátu. [11]

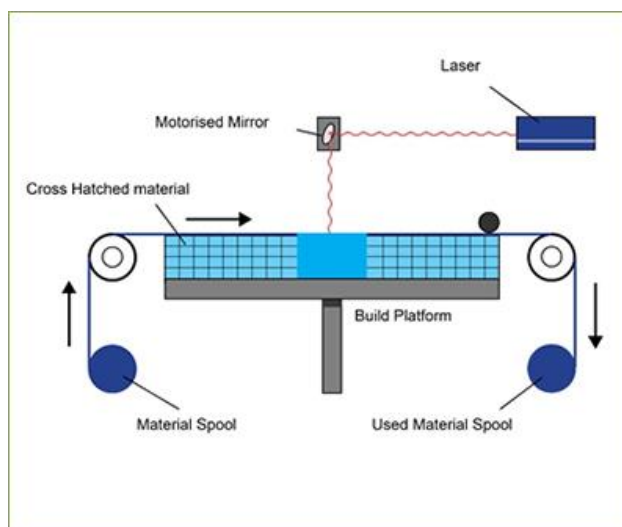


Obrázek 12: Directed energy deposition [11]

Drát je méně přesný kvůli povaze předdefinovaného tvaru, ale je materiálově efektivnější ve srovnání s práškem, protože se používá pouze požadovaný materiál. Způsob tavení materiálu se pohybuje mezi laserem, elektronovým paprskem nebo plazmovým obloukem, a to vše v kontrolované komoře, kde atmosféra má sníženou hladinu kyslíku. [11]

#### 4.7 Sheet Lamination

Proces Sheet lamination známý také jako Laminated Object Manufacturing (LOM) je technika laminování listů na bázi papíru. Proces LOM používá během procesu tisku šrafovací metodu, která umožňuje snadné odstranění po sestavení. Laminované objekty se často používají pro estetické a vizuální modely a nejsou vhodné pro strukturální použití. Je možné vyrábět funkční lehké technické komponenty pro letecký a automobilový průmysl za velmi konkurenceschopné náklady. Proces může spojit různé materiály a vyžaduje relativně málo energie, protože kov není roztaven. [11]



Obrázek 13: Sheet lamination [11]

## 5 Zkoušení přesnosti, zkušební artefakty pro 3D tisk metodou DLP/SLA

Stereolitografie (SLA) a Digital light processing (DLP) jsou dva nejběžnější procesy pro 3D tisk z pryskyřice. 3D tiskárny na bázi pryskyřice jsou oblíbené pro výrobu vysoce přesných, izotropních a vodotěsných prototypů a dílů z řady materiálů s velmi dobrými vlastnostmi. Zatímco tyto technologie byly kdysi složité a nákladově neúnosné, dnešní maloformátové stolní 3D tiskárny SLA a DLP vyrábějí díly v průmyslové kvalitě za dostupnou cenu a bezkonkurenční všestrannost díky široké škále materiálů. [22]

Oba procesy fungují tak, že selektivně vystavují kapalnou pryskyřici světelnému zdroji (SLA - laseru, DLP - projektoru) a vytvářejí velmi tenké pevné vrstvy reaktoplastu, které se skládají a vytvářejí pevný objekt. I když jsou v zásadě velmi podobné, mohou tyto dvě technologie produkovat výrazně odlišné výstupy. Můžeme je porovnat z hlediska rozlišení, přesnosti, velikosti pracovního prostoru a rychlosti. [22]

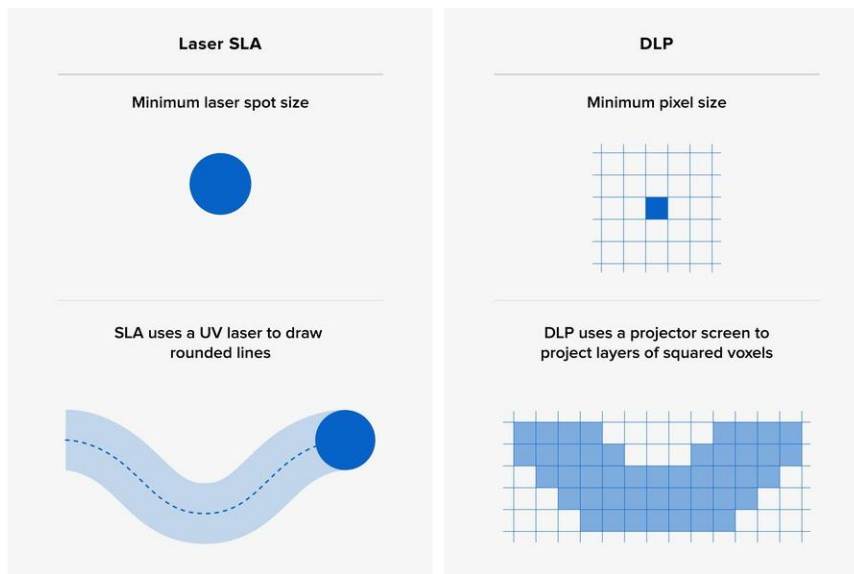
### 5.1 Rozlišení

Rozlišení se ve specifikačních listech 3D tiskáren zobrazuje častěji než jakákoli jiná hodnota, ale je také společným důvodem pro nejasnosti. 3D tiskárny na bázi pryskyřice, jako jsou SLA a DLP, nabízejí jedny z nejtenčích vrstev všech technologií 3D tisku a uživatelé si mohou běžně vybrat z řady možností výšky vrstvy mezi 25–300 mikrometry, což návrhářům umožňuje dosáhnout rovnováhy mezi detaily a rychlostí.

U 3D tisku DLP je rozlišení XY definováno velikostí pixelu, což je nejmenší rozměr, který projektor dokáže reprodukovat v jedné vrstvě. Výsledkem je, že většina stolních 3D tiskáren DLP má pevné rozlišení XY, obvykle mezi 35 - 100 mikrometry.

U 3D tiskáren SLA je rozlišení XY kombinací velikosti bodu laseru a přírůstků, kterými lze řídit laserový paprsek. 3D tiskárna vybavena laserem s bodovou velikostí 85 mikrometrů, ale díky procesu stálého skenování se laser může pohybovat v menších krocích a tiskárna může konzistentně dodávat součásti s rozlišením 25 mikrometrů XY. [22]





Obrázek 14: Porovnání SLA a DLP [22]

## 5.2 Velikost pracovního prostoru

U 3D tiskáren DLP existuje závislost mezi rozlišením a velikostí pracovního prostoru. Rozlišení závisí na projektoru, který určuje počet dostupných pixelů / voxelů. Ve výsledku jsou 3D tiskárny DLP obecně optimalizovány pro konkrétní případy použití. Některé mají menší pracovní prostor a nabízejí vysoké rozlišení pro výrobu malých detailních kousků, jako jsou šperky, zatímco jiné mohou vyrábět větší části, ale v nižším rozlišení. [22]

U procesu stereolitografie je pracovní objem 3D tiskárny SLA zcela nezávislý na rozlišení tisku. Jeden tisk může mít libovolnou velikost a jakékoli rozlišení na jakémkoli místě v oblasti sestavení. To umožňuje 3D tisk velkých dílů ve vysokém rozlišení nebo velké dávky detailních malých dílů pro zvýšení propustnosti se stejným strojem. Při tisku větších dílů vznikají na součásti velké pnutí, při oddělování vytvrzené vrstvy od nádrže. [22]

## 5.3 Kvalita povrchu

3D tiskárny SLA a DLP jsou využívány pro vytváření dílů s nejmenší drsností povrchu ze všech procesů 3D tisku. Když popisujeme rozdíly, ve většině případů jsou viditelné pouze na malých částech nebo vysoce podrobných modelech. Protože objekty jsou při 3D tisku vytvořeny z vrstev, 3D výtisky mají často viditelné vodorovné čáry vrstev. Protože však DLP vykresluje obrázky pomocí obdélníkových voxelů, je zde také

účiněk svislých voxelových čar. Na tomto obrázku můžete vidět svislé voxelové čáry tak, jak se přirozeně objevují vpravo na obrázku.

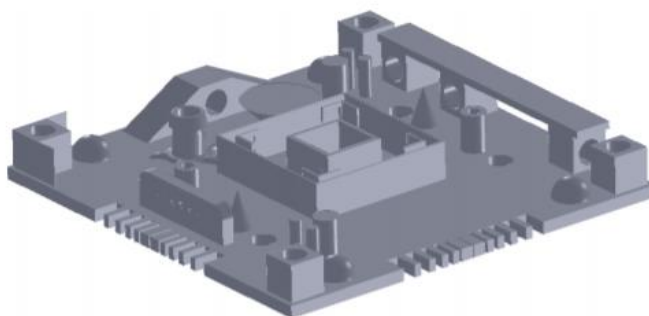


*Obrázek 15:Kvalita povrchu SLA vs. DLP [22]*

## 6 Zkušební artefakty pro 3D tisk

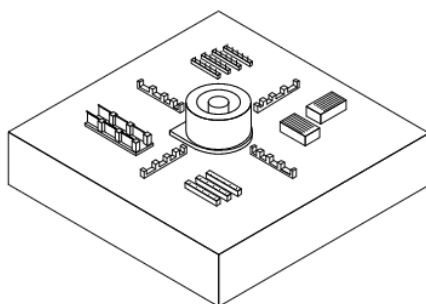
Zkušební artefakt lze použít ke kvantitativnímu vyhodnocení výkonu stroje nebo procesu. Většina návrhů testovacích artefaktů má na čtvercové nebo obdélníkové základně různé prvky. Existují standardizované testovací díly, které lze použít ke kvantitativnímu vyhodnocení výkonu stroje nebo procesu. Jasnou výhodou standardizovaného dílu je, že různé stroje nebo procesy, které vyrábějí stejné díly lze snadno porovnat. [20, 21]

Pro 3D tisk nejdříve vznikl artefakt ve tvaru písmene U s různými geometrickými prvky, jako jsou kruhové otvory (v různých orientacích), kruhové výstupky, čtvercové otvory a šikmé plochy. Na těchto výsledcích stavěli další vědci, kteří přidali další různé prvky včetně převisů a objektů s volným tvarem, aby se demonstrovaly některé výhody aditivní výroby. [20, 21]



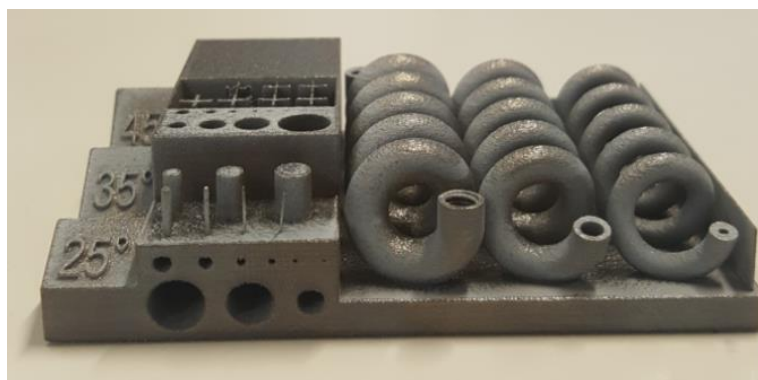
Obrázek 16: Zkušební artefakt [20]

Standardní testovací artefakt by měl být dostatečně velký, aby také otestoval výkon stroje v extrémních podmínkách platformy. Měl by mít dostatečný počet malých, středních a velkých prvků, jak otvory, tak i výstupky, které pomáhají při ověřování kompenzace šířky paprsku. Stavba by neměla trvat příliš dlouho, nespotřebovat velké množství materiálu a měla by být snadno měřitelná. Na obrázku 18 můžeme vidět jednoduchý artefakt. [20, 21]



*Obrázek 17: Testovací artefakt [20]*

Zkušební artefakt si každý může navrhnout. Návrh srovnávacího artefaktu se spirálou na obrázku 19 byl připraven s přihlédnutím spíše k požadavkům na produkt než na stroj. A artefakt na obrázku 20 je určen výslovně k testování materiálů pro 3D tisk složitých modelů s vysokým rozlišením.



*Obrázek 18: Zkušební artefakt se spirálou [23]*



*Obrázek 19: Zkušební artefakt AMERALABS [16]*

## 7 Vlastní realizace artefaktu

### 7.1 Návrh zkušebních artefaktů

Tento návrh byl inspirován projektem testovacího modelu pro 3D tiskárny s vysokým rozlišením zveřejněn na webových stránkách [www.3Dsla.ru](http://www.3Dsla.ru). Je vytvořen převážně z částí, které jsou nejčastěji testovány na SLA tiskárnách. Navržené artefakty jsou doslova pro testování nastavení 3D tiskárny a usnadňují najít problémové oblasti. Ukazují nám kvalitu pryskyřice používané při tisku, zaostření optického systému a jak by měla být dlouhá doba expozice. Celkově jsou navržené tak, aby nám výsledek ukázaly, co tiskárna dokáže. Návrh tedy téměř stejných dvou artefaktů, které byly pouze jinak orientované při tisku.

### Piny a otvory

Tento test se skládá z bloku lišt tvořených piny a otvory. Piny o proměnné velikosti 0,35 – 0,1 mm v krocích po 0,05 mm a poslední pin má rozměr 1,25 mm. Otvory o velikosti 0,3 – 0,1 mm po 0,05 mm. Cílem je vytvořit všechny piny / otvory. To není reálné, takže tímto testem zjišťujeme minimální možnosti funkcí. Tento test ukazuje skutečné rozlišení v rovině XY.

### Overhang

Test, který ukazuje, jaká je přesnost při tisku převisů bez podpor.

### Polokoule

Tato zkouška slouží pro obecnou vizuální kontrolu kvality tisku malých dílů. Cílem je, aby polokoule byla s hladkým povrchem, symetrická a měla správný tvar.

### Šachovnice

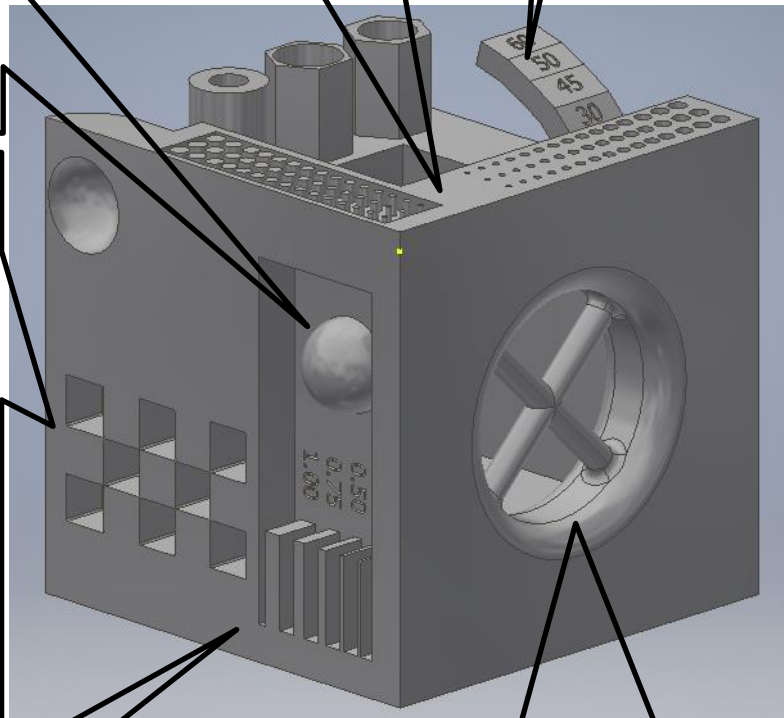
Skládá se ze čtvercových výřezů v šachovém vzoru s krokem 2,5 mm a hloubkou 2,5 mm. Cílem je mít všechny výřezy s ostrými hranami společně se správnou hloubkou. Tento test ukazuje výkon celého systému včetně tiskového materiálu.

### Sloty

Tento test se skládá ze slotů s proměnnou šířkou 0,15 - 1,0 mm. Cílem této zkoušky je zajistit, aby všechny sloty byly viditelné, bez viditelných trhlin, stejné výšky a vertikálně jednotné.

### Kříž

Tato zkouška 3D tiskárny obsahuje dva sloupky o průměru 1,5 mm, které se protínají ve středu kruhového výřezu. Můžeme změřit kruhovitost celého výřezu, avšak cílem této zkoušky je vytvořit jasný kříž tvořený těmito dvěma sloupky bez rozměrových nepravidlostí, mezer nebo trhlin. Tento test dokáže charakterizovat parametry tisku, např. dobu expozice, ale i základní vlastnosti materiálu.



### Prohlubující se šestiúhelník

Tento test se skládá z kruhu s 6 segmenty s hloubkami 0,020–0,125 mm. Každý segment je prohlouben o 0,025 mm. Cílem je mít jasně viditelné všechny segmenty a přechody mezi jednotlivými segmenty. Testuje se minimální hloubka ve vertikálním směru.

### Dutá polokoule a tloušťka stěny

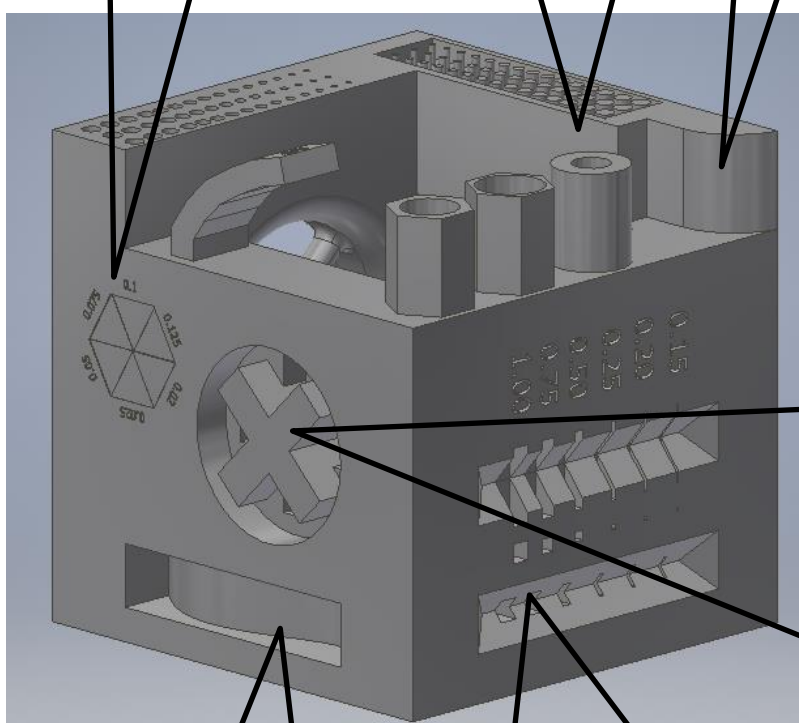
Tato zkouška slouží pro kontrolu symetrie a povrchu s jemným povrchem. Zjistíme také jaká je minimální možná tloušťka stěny modelu.

### Válec

Tato zkouška je především na zkoušení válcovitosti a soustřednosti.

### Kalibrační zkouška pro svislou plochu

Tato zkouška obsahuje všesměrové symetrické výstupky a vyhloubení umístěné v dokonale kulatém vybrání. Cílem zkoušky je, aby výčnělky a vyhloubení vypadaly stejně a symetricky, úhly vytvořené prvky byly jasné a stejné. Pokud kruhové vybrání a vnitřní výčnělky nejsou stejně široké a vysoké, tak to ukazuje problémy s nadměrnou expozicí a nadměrnou optickou průhledností fotopolymeru.



### Zvlněná plocha

Tato zkouška obsahuje zvlněný svislý prvek umístěný ve vybrání. Cílem je dosáhnout povrchové vlny bez viditelných kroků. Je to zkouška kvality kalibrace intenzity expozice a v DLP systémech tento test také charakterizuje kvalitu výpočtu pixelů.

### Drážky


Tato zkouška obsahuje otvory o šířce 0,15 až 1,0 mm, které jsou určeny k odhalování několika problémů s 3D tiskárnou. Pokud jsou otvory příliš široké, měla by se doba expozice zvýšit a na druhou stranu, pokud jsou otvory zavřené, měla by se expozice snížit. Špatná přilnavost vrstvy v důsledku nesprávného nastavení tisku může vést k delaminaci vrstvy během procesu 3D tisku. Pokud je většina z těchto otvorů uzavřená nebo neviditelná, může to být výsledkem nadměrné polymerace, tj. nadměrného vytvrzení. V dolní části vy měly být otvory průchozí.

## 7.2 Tisk artefaktu

Artefakt ve dvou polohách (vodorovná a naklonění o 15°) byl vytištěn na tiskárně ANYCUBIC Photon S, pracující na principu technologie tisku CDLP. Parametry tiskárny jsou v níže uvedené tabulce.

Tabulka 1: Specifikace tiskárny ANYCUBIC Photon S

Specifikace	
Technika	LCD Shadow Masking
Zdroj světla	UV Matrix (vlnová délka - 405 nm)
Rozlišení XY	47 $\mu\text{m}$
Přesnost osy Z	0,00125 mm
Doporučená tloušťka vrstvy	0,01 – 0,2 mm
Doporučená rychlost tisku	20 mm/h
Jmenovitý výkon	50 W

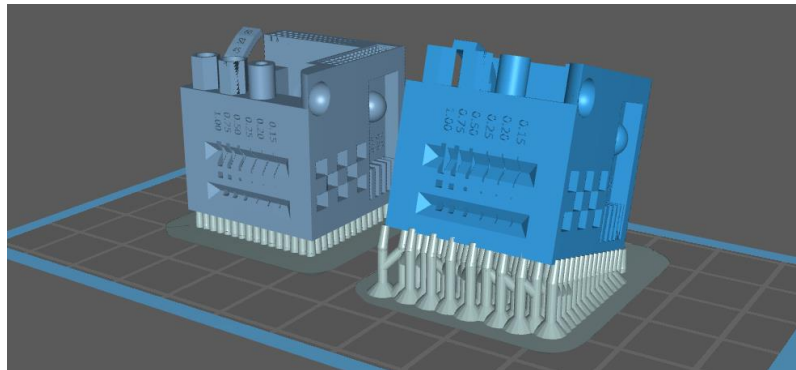
A photograph of the ANYCUBIC Photon S 3D printer. It is a white, upright machine with a large yellow protective enclosure. The top part is open, revealing the internal printing mechanism, including a blue LCD screen and a red nozzle assembly. A small digital display is visible on the front panel.

Vstupní nastavení tisku bylo následující:

- Výška vrstvy 0,05 mm,
- Doba expozice 6 s,
- Spodní doba expozice 50 s (expozice prvních vrstev),
- Zdvihací vzdálenost 5 mm,
- Rychlost zdvihu 65 mm/min,
- Zatahovací rychlost 150 mm/min.
- Doba tisku byla 3 hodiny.



Na obrázku 20 je zobrazeno rozložení artefaktů v softwaru Chitubox, který byt využit na přípravu tiskových dat.



*Obrázek 20: Rozložení artefaktů v softwaru Chitubox*

K tisku byla použita tekutá fotopolymerní pryskyřice a výsledek tisku je zobrazen na obrázku 21.



*Obrázek 21: Vytištěné artefakty*

### 7.3 Analýza artefaktu pomocí výpočetní tomografie

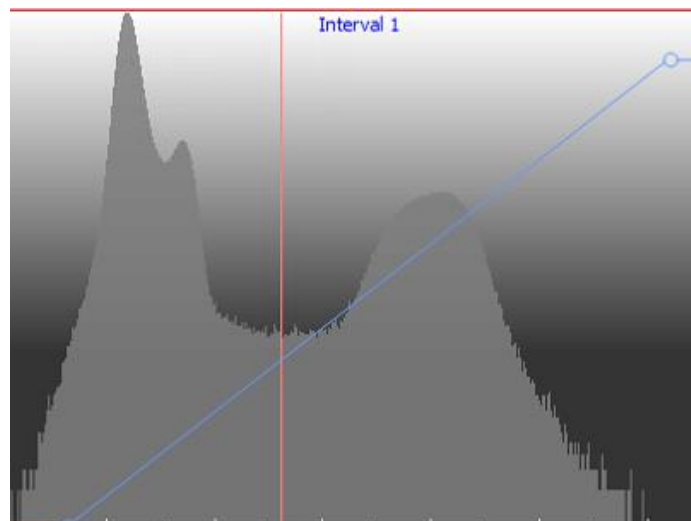
Výpočetní tomografie (CT - Computed Tomography) je metoda nedestruktivního zkoušení, která je využívána pro 3D zobrazování testovaných objektů ve vysokém rozlišení. CT zobrazuje trojrozměrný model, který je konstruovaný ze snímků zachycených na detektoru.

Testované artefakty jsou skenované na přístroji ZEISS METROTOM 1500. Nejprve bylo zvoleno vhodné upnutí do polystyrenového bloku a následně nastavení vstupních parametrů:

- Napětí 190 kV
- Proud 134  $\mu$ A
- Expoziční doba 900 ms
- 3 projekce v každé pozici
- Voxelové rozlišení vzorků 22,75  $\mu$ m

#### 7.4 Analýza a zhodnocení výsledků

Analýza výsledků byla provedena v programu VG Studio Max. Po naskenování byl získán mrak bodů celé součásti. Nejprve bylo nutné definovat povrch tělesa, k čemuž bylo využito stanovení tzv. Isosurface, tedy hranice materiálu definované hodnotou šedi, která odpovídá hustotě analyzovaného materiálu. V oblasti histogramu je šedá hodnota povrchu označena červenou svislou čarou, rovinou isosurface.



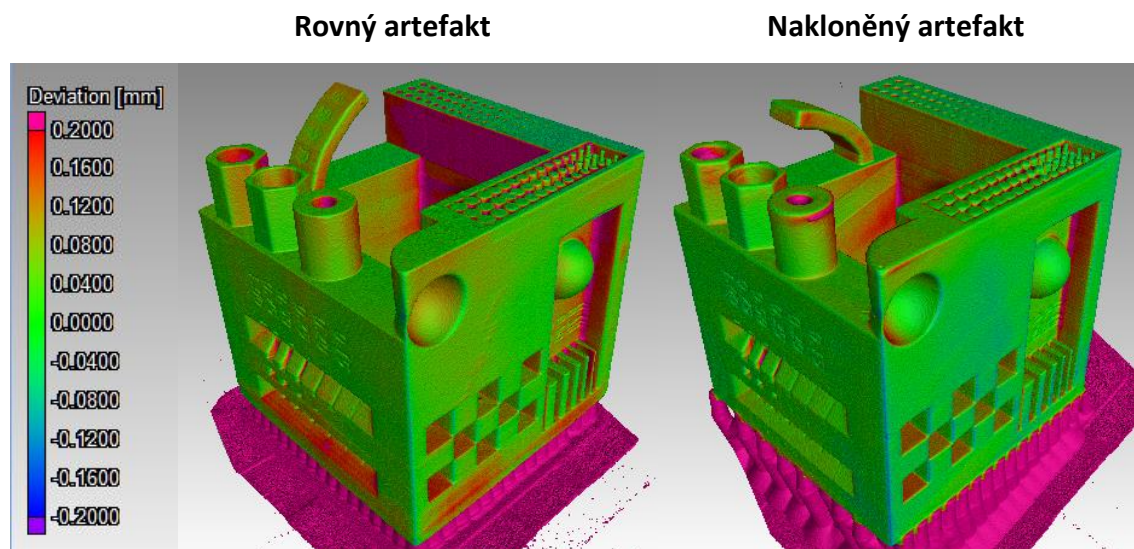
Obrázek 22: Histogram s rovinou isosurface

Tato šedá hodnota slouží jako prahová hodnota – světlejší oblasti jsou považovány za materiál, tmavší oblasti jsou považovány za podklad. Stanovení povrchu vypočítá hranici materiálu v přesnosti voxelů pomocí trilineární interpolace.

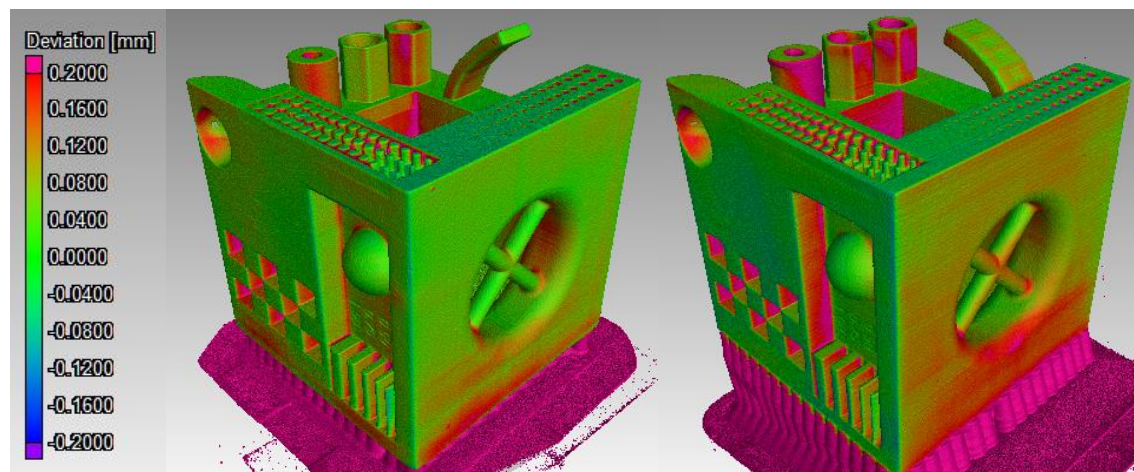
V dalším kroku bylo provedeno vyrovnání objektu v prostotu a definování souřadného systému pomocí metody 3-2-1, aby bylo možné porovnat naskenovaný artefakt s nominálními hodnotami CAD modelu.

#### 7.4.1 Analýza odchylek tvaru

Po vyrovnání CAD modelu na skenovaný artefakt byla provedena analýza odchylek tvaru u obou vytištěných variant. Rovně postavený artefakt (zelený CAD model) a o 15° nakloněný artefakt (modrý CAD model) jsou na následujících obrázcích porovnány ve čtyřech pohledech.

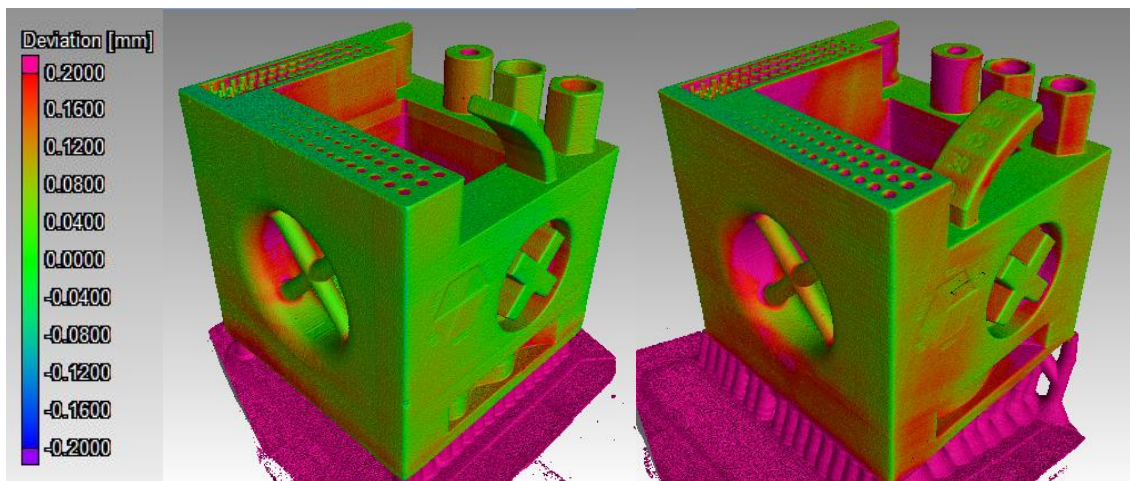


Obrázek 23: Analýza odchylek tvaru artefaktů (pohled A)

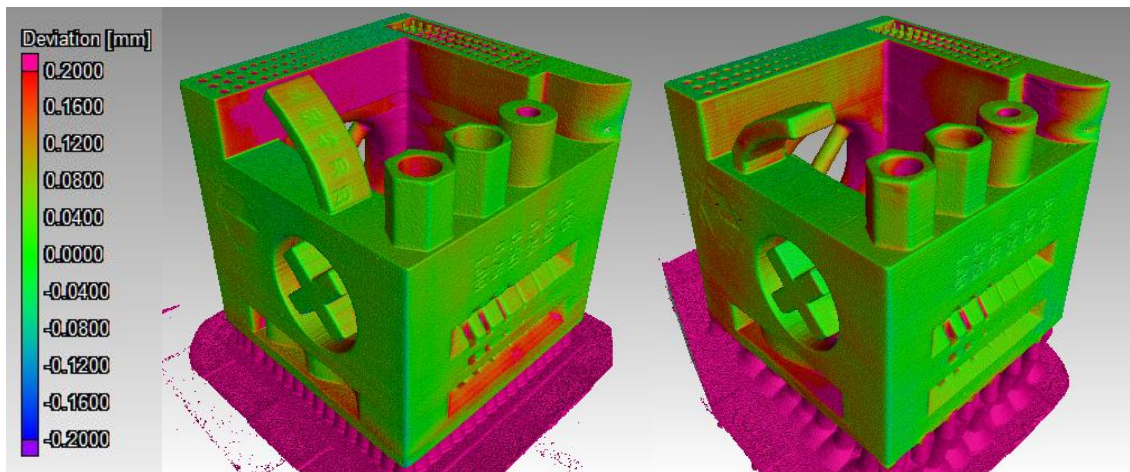


Obrázek 24: Analýza odchylek tvaru artefaktů ((pohled B)



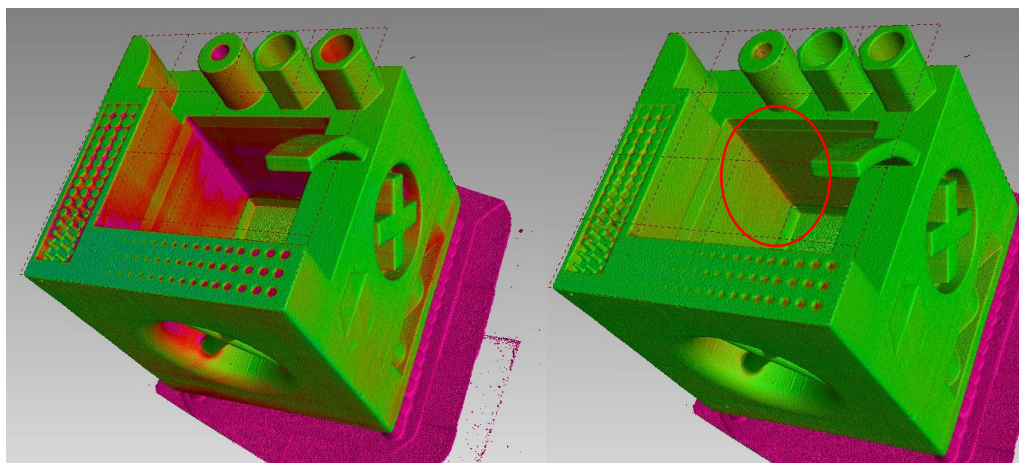


Obrázek 25: Analýza odchylek tvaru artefaktů (pohled C)



Obrázek 26: Analýza tvaru odchylek artefaktů (pohled D)

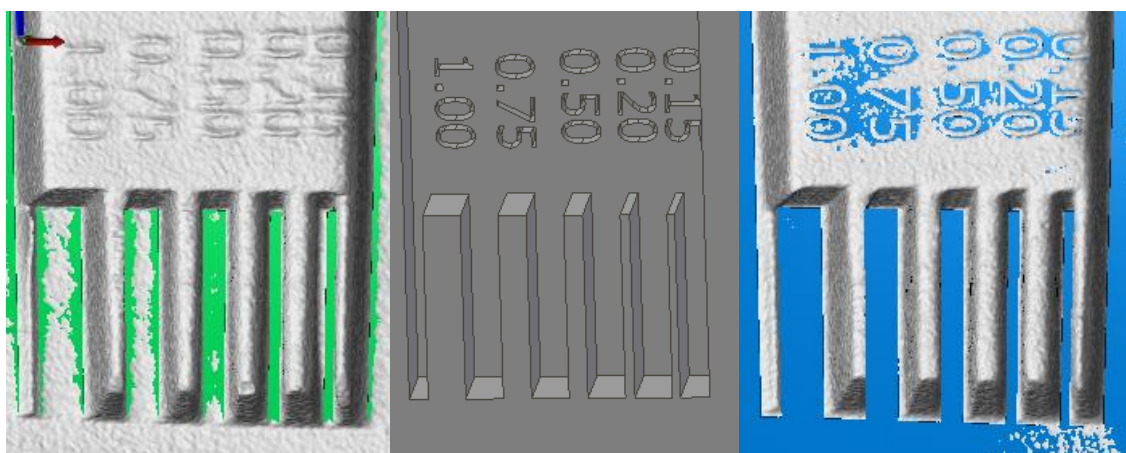
Tato analýza slouží pro barevné zobrazení odchylek vůči modelu. Pokud například srovnáme pohled C na obrázku 25, uvidíme jasné rozdíly zbarvení odchylek artefaktů u výřezu s křížem. Z grafického vyhodnocení vidíme, že díly nesplňují ani tolerance  $\pm 0,2\text{mm}$ , Přičemž o technologií SLA a DLP jsou mnohdy proklamovány i výrazně nižší hodnoty. Reálně artefakt obsahuje i místa, kde je překračována i tolerance  $\pm 0,5\text{mm}$  (např. vnitřní roh znázorněný elipsou na obrázku 27).



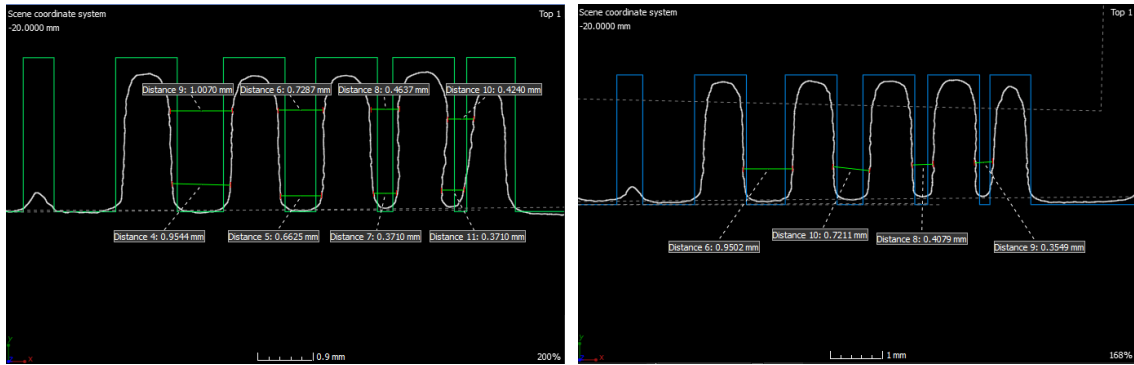
Obrázek 27: Analýza tvaru odchylek

## 7.4.2 Sloty

Na níže uvedených obrázcích jsou zobrazeny sloty o tloušťkách 0,15; 0,20; 0,50; 0,75 a 1,00 mm. Uprostřed CAD model, vlevo díl tisknutý v horizontální poloze (jmenovitá data zobrazena zeleně) a vpravo nakloněný model (jmenovitá data reprezentována modrou).



Obrázek 28: Sloty



Obrázek 29: Sken slotů

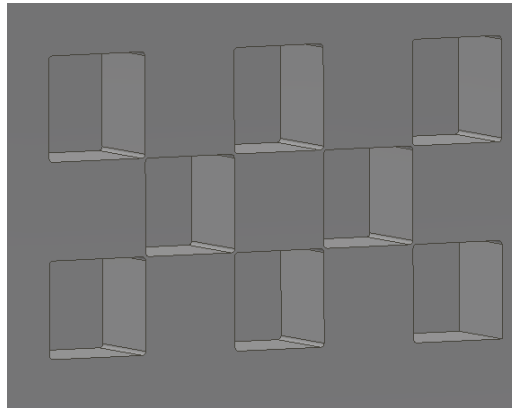
Podíváme-li se na sken artefaktu, tak můžeme pozorovat, že nejužší slot (vpravo) je viditelně zdeformovaný a naopak mezi nejširším slotem (vlevo) a stěnou výklenku není průchozí spára zachována a oba prvky jenž jsou od sebe 0,5 mm splývají. Rozměry slotů byly naměřeny až dvakrát tak větší než je jmenovitá hodnota. Co se týče dodržení kolmosti, rovinnosti nebo ostrých úhlů, tak můžeme říci, že v takto malých rozměrech je to nereálné. Udávané rozlišení tiskárny na úrovni 47 $\mu$ m je v praktických úlohách na drobných prvcích nevypovídající o schopnostech zařízení. V obou variantách byly orientačně změřeny rozměry slotů a jsou níže uvedeny v tabulce.

Tabulka 2: Rozměry slotů

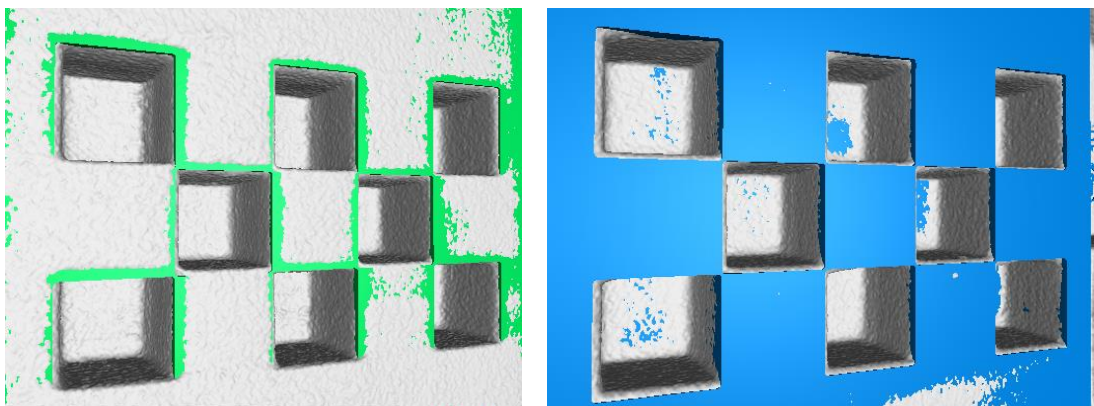
Jmenovitá hodnota [mm]	Rozměr u rovného modelu [mm]	Rozměr u nakloněného modelu [mm]
0,15	0,37	0,35
0,20	0,41	0,41
0,50	0,66	0,72
0,75	0,95	0,95
1,00		-----

### 7.4.3 Šachovnice

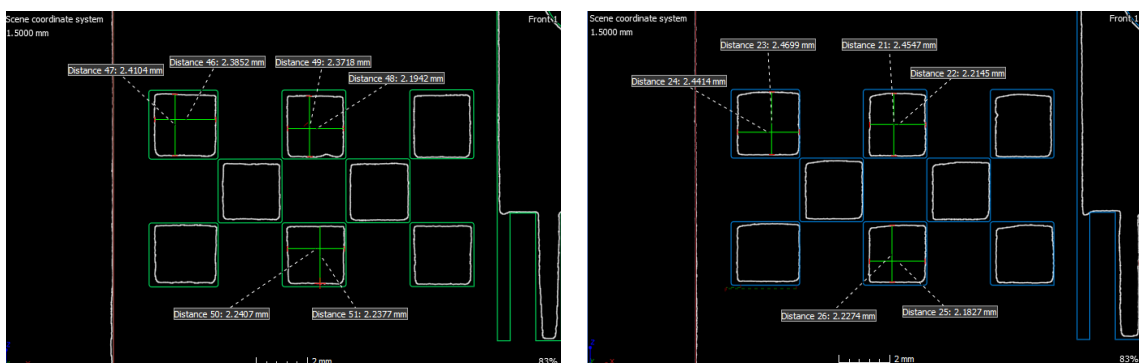
Test šachovnice 3D tiskárny se skládá ze čtvercových výřezů v šachovém vzoru s krokem 2,5 mm podél os a hloubkou 2,5 mm. Cílem této zkoušky bylo mít všechny výřezy s ostrými hranami a správnou hloubkou a bez deformace horizontálního přemostění, jenž není nijak podepřeno.



Obrázek 30: Šachovnice (CAD model)

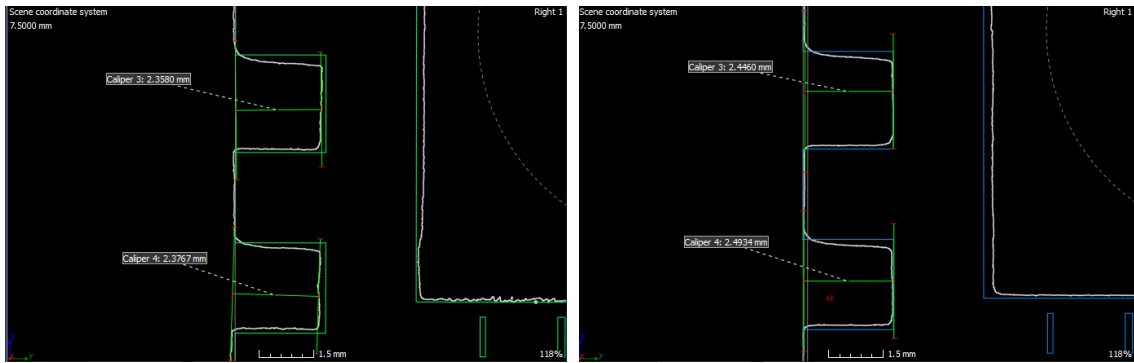


Obrázek 31: Sken šachovnice (3D pohled)

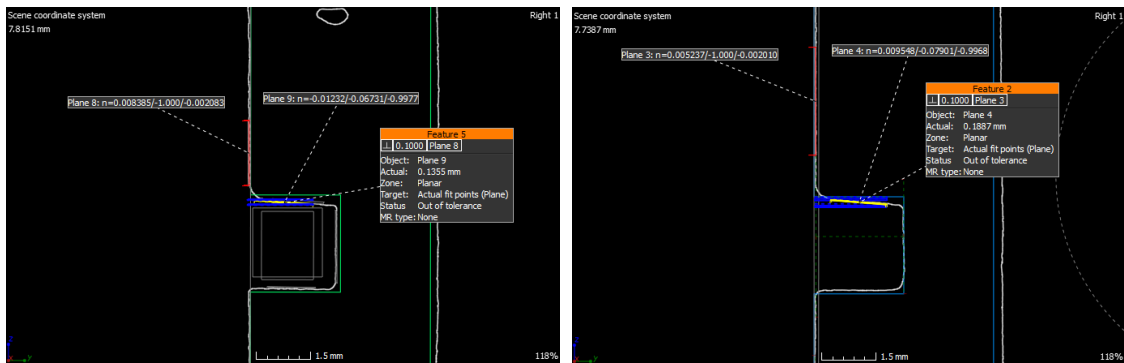


Obrázek 32: Řez šachovnice (rozměry)

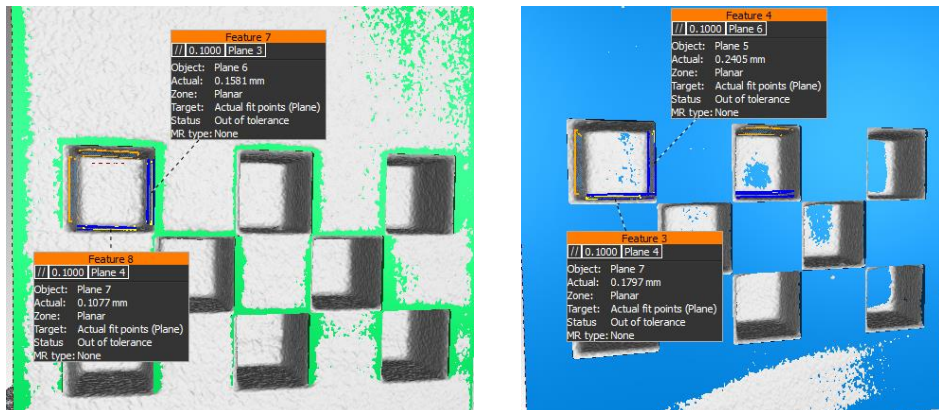




Obrázek 33: Řez šachovnice (hloubka)



Obrázek 34: Řez šachovnice (kolmost)



Obrázek 35: Šachovnice (rovnoběžnost)

Byly změřeny rozměry šachovnice a průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce. U nakloněného modelu byly rozměry o několik setin větší a hloubka výřezu se nejvíce blížila jmenovité hodnotě. Vliv polohy na přesnost tohoto prvku není patrný. Pro zajímavost byla změřena odchylka kolmosti stěny artefaktu vůči horní stěně výřezu, která byla výrazně zešikmená a dále rovnoběžnost ploch výřezu. U obou hodnot jsou větší odchylky u nakloněného modelu, což můžeme přisuzovat právě orientaci artefaktu.



Tabulka 3: Rozměry šachovnice

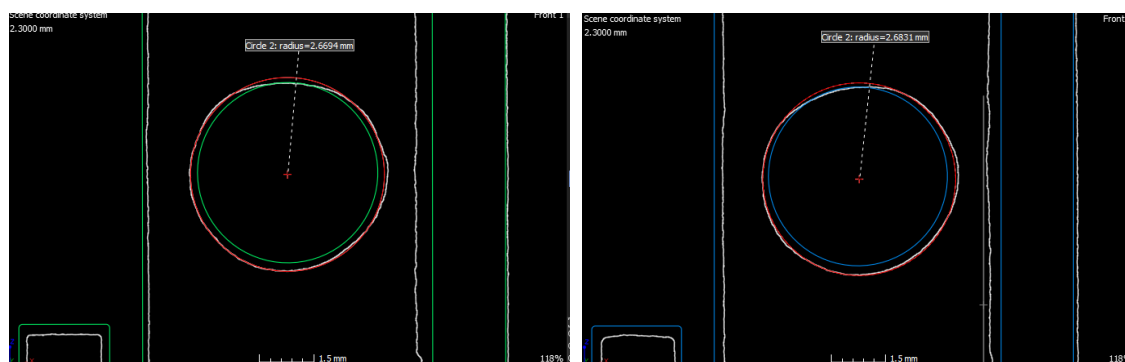
Jmenovitá hodnota	Průměrný rozměr u rovného modelu [mm]	Průměrný rozměr u nakloněného modelu [mm]
Šířka 2,5 mm	2,27	2,32
Výška 2,5 mm	2,33	2,38
Hloubka 2,5 mm	2,36	2,46
Odchylka kolmosti ploch	0,14	0,19
Odchylka rovnoběžnosti ploch	0,16	0,24

#### 7.4.4 Polokoule

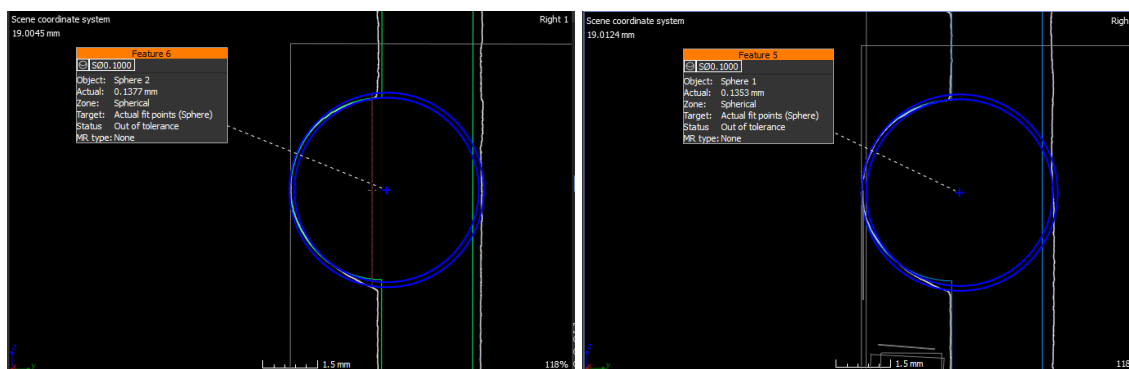
Tato zkouška slouží pro obecnou vizuální kontrolu kvality tisku malých dílů. Cílem je, aby polokoule byla přesná, s hladkým povrchem a malou chybou tvaru. Jmenovitá hodnota poloměru je 2,5 mm.



Obrázek 36: Polokoule



Obrázek 37: Sken polokoule v řezu

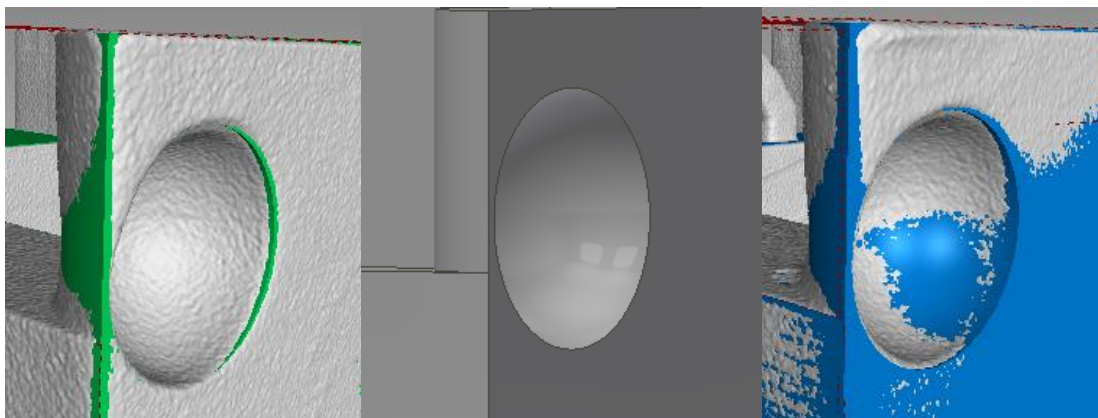


Obrázek 38: Sken polokoule (chyba tvaru)

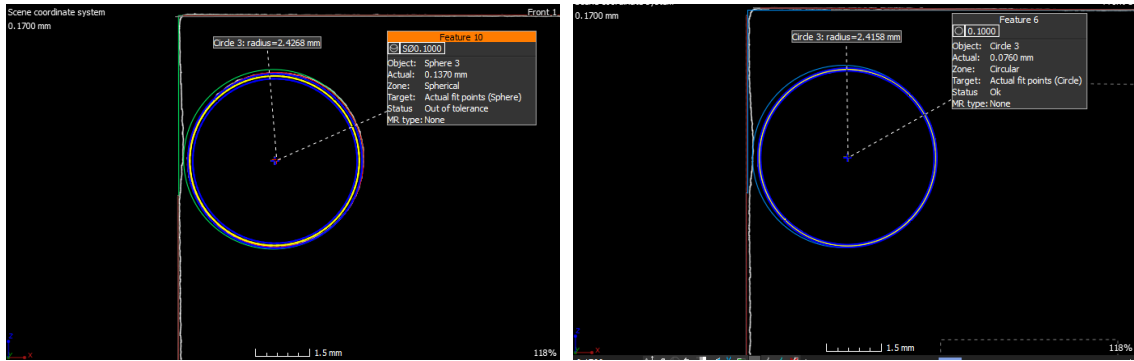
Na této polokouli byla změřena kruhovitosť a chyba tvaru. Poloměr polokoule byl naměřen u obou artefaktů naměřen srovnatelný 2,67 mm resp. 2,68 mm, tudíž je větší než její jmenovitá hodnota 2,5 mm. Zároveň můžeme vidět na posledních obrázcích, že polokoule v obou případech má viditelnou chybu tvaru.

#### 7.4.5 Dutá polokoule a tloušťka stěny

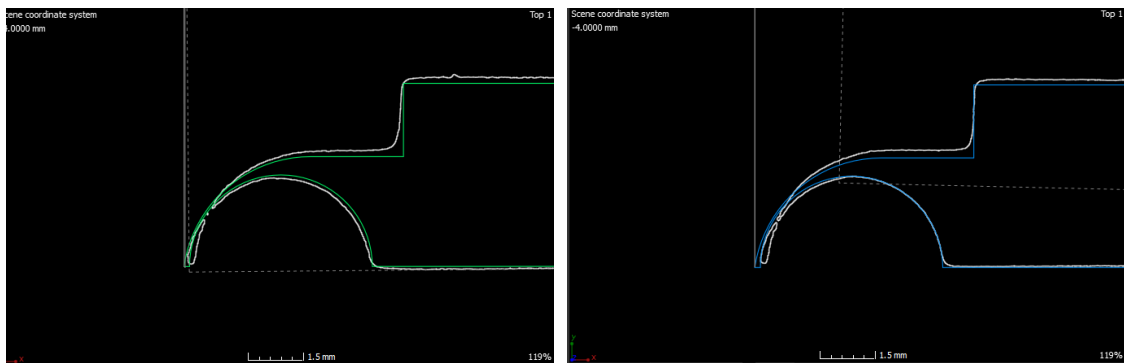
Tento test je podobný jako předchozí na vizuální kontrolu a chybu tvaru a k tomu je přidán test minimální tloušťky stěny. Nejmenší rozměr tloušťky stěny je 0,04 mm.



Obrázek 39: Dutá polokoule



Obrázek 40: Sken duté polokoule (kruhovitost)

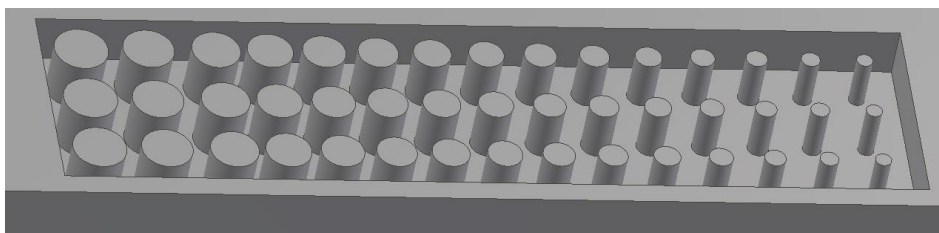


Obrázek 41: Sken duté polokoule (tloušťka stěny)

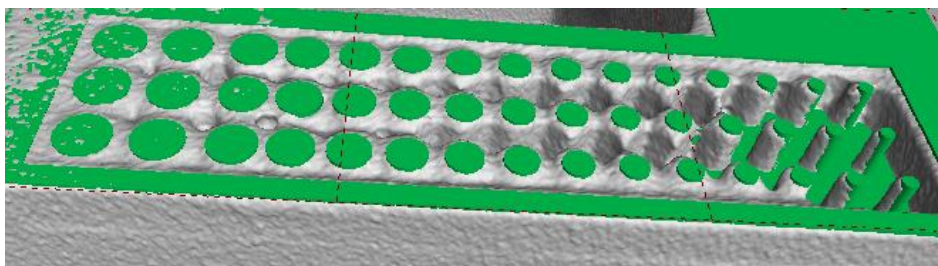
Odchylka tvaru polokoule je u nakloněného modelu o 0,06 mm menší než u rovně orientovaného a to 0,07 mm. Tloušťka stěny v místě, kde má mít 0,04 mm je deformovaná a reálně vznikla pouze průhledná blána. U rovného modelu je viditelnější deformace než u nakloněného, jak je znázorněno na obrázcích.

#### 7.4.6 Piny a otvory

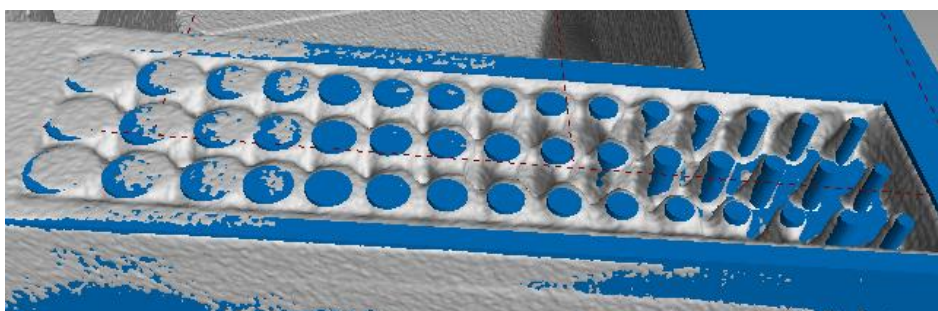
Piny jsou o průměru 0,35 mm s krokem 0,05 mm až do 0,95 mm s konstantní roztečí 1,00 mm. Na níže uvedených obrázcích můžeme pozorovat, že kvůli malým mezerám mezi piny a stěnou dutiny je materiál spečený. Je vidět, že tento prvek je mimo možnosti zkoušeného procesu tisku.



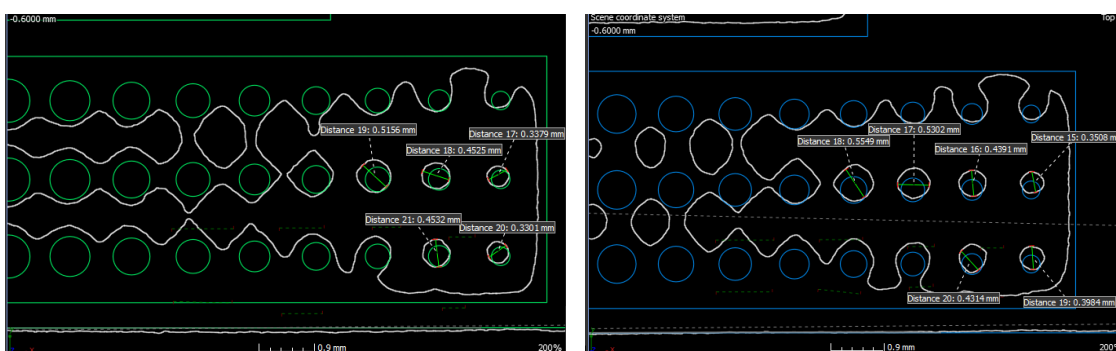
Obrázek 42: Piny (CAD model)



Obrázek 43: Sken pinů (rovně orientovaný model)



Obrázek 44: Sken pinů (nakloněný model)



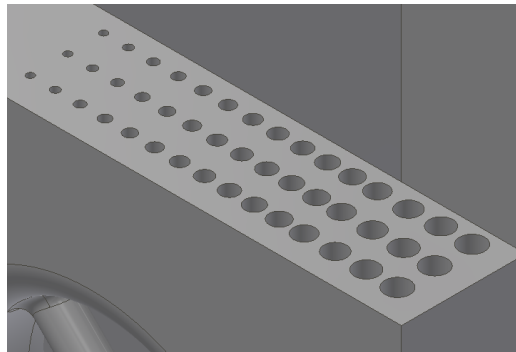
Obrázek 45: Řez pinů

Pokud se podíváme na pohled shora, tak piny nejsou kruhovitěho tvaru a jsou výrazně posunuté v ose y. Nespečené piny byly změřeny a následně uvedeny do tabulky.

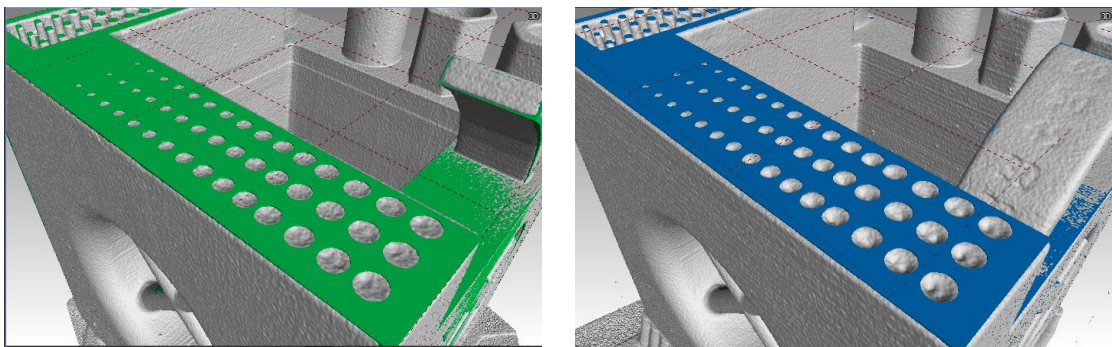
Tabulka 4: Rozměry pinů

Jmenovitá hodnota [mm]	Průměrný rozměr u rovného modelu [mm]	Průměrný rozměr u nakloněného modelu [mm]
0,35	0,33	0,38
0,4	0,45	0,43
0,45	0,51	0,53

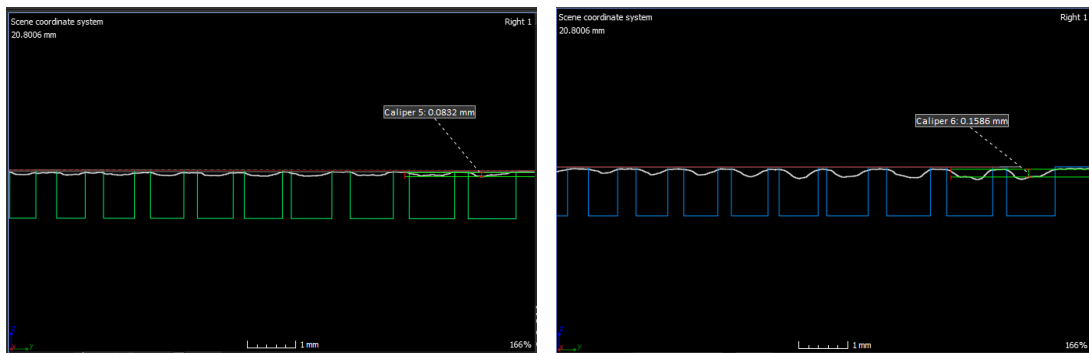
Díry jsou vymodelovány ve stejných průměrech 0,35 – 1,00 po kroku 0,05 mm s roztečí 1,5 mm. Na obou naskenovaných artefaktech je vidět, že díry se vůbec nevytiskly a místo nich jsou jen nepatrné důlky.



Obrázek 46: Díry (CAD model)



Obrázek 47: Sken děr



Obrázek 48: Řez děr (pohled z boku)



Obrázek 49: Řez děr (pohled shora)

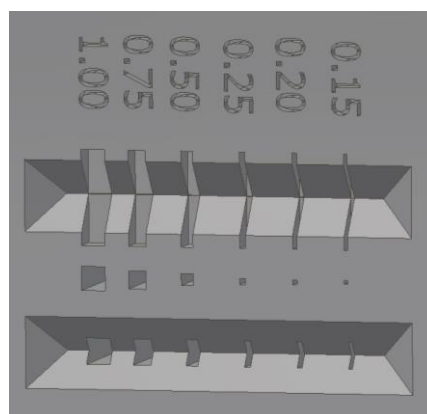
Na místech, kde měly být vytištěny díry, vznikly pouze náznaky důlků, které jsou vidět na obrázku 48. V řezu na pohledech shora (obrázek 49) můžeme vidět, že u nakloněného artefaktu jsou náznaky děr i u malých rozměrů, kdežto u rovně orientovaného artefaktu nejsou téměř žádné. Orientační rozměry jsou uvedeny v tabulce.

*Tabulka 5: Rozměry děr*

Jmenovitá hodnota [mm]	Průměrný rozměr u rovného modelu [mm]	Průměrný rozměr u nakloněného modelu [mm]
1,0	0,27	0,7
0,95	-	0,73
0,9	-	0,67
0,85	-	0,58
0,8	-	0,58
0,75	-	0,52
0,7	-	0,46

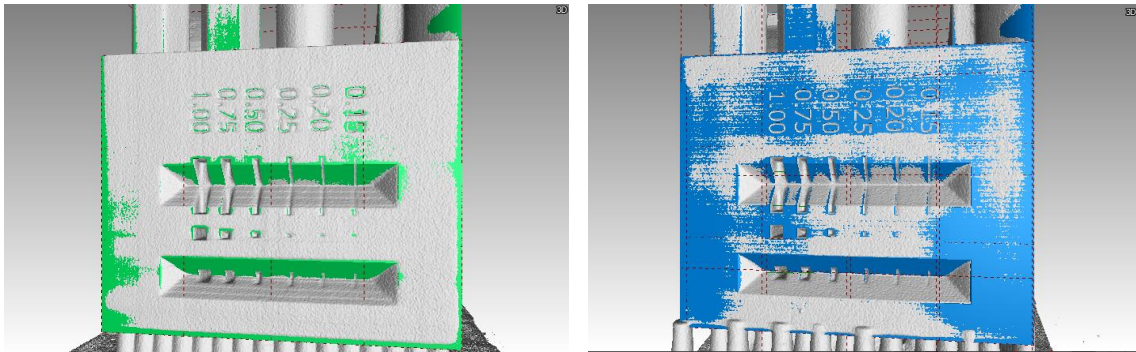
#### 7.4.7 Drážky

Drážky a díry na jedné straně artefaktu jsou navrženy na tři způsoby. První podlouhlá drážka, v druhé řadě je průchozí čtvercová díra a ve třetí řadě neprůchozí čtvercová díra.



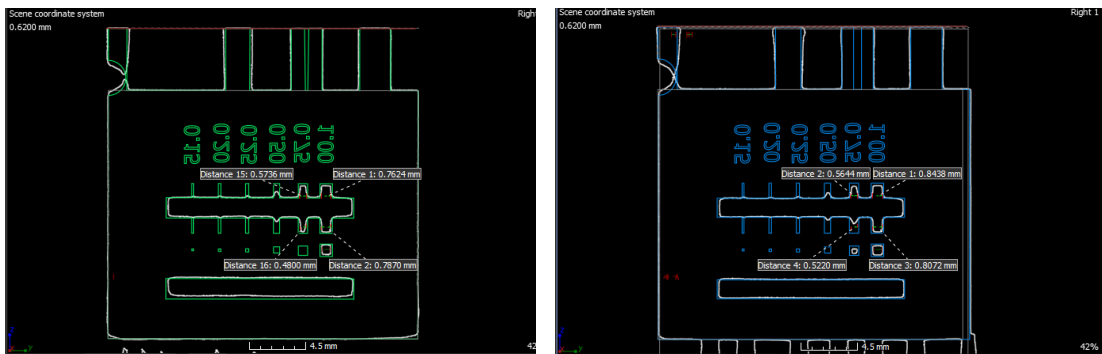
*Obrázek 50: Drážky (CAD model)*



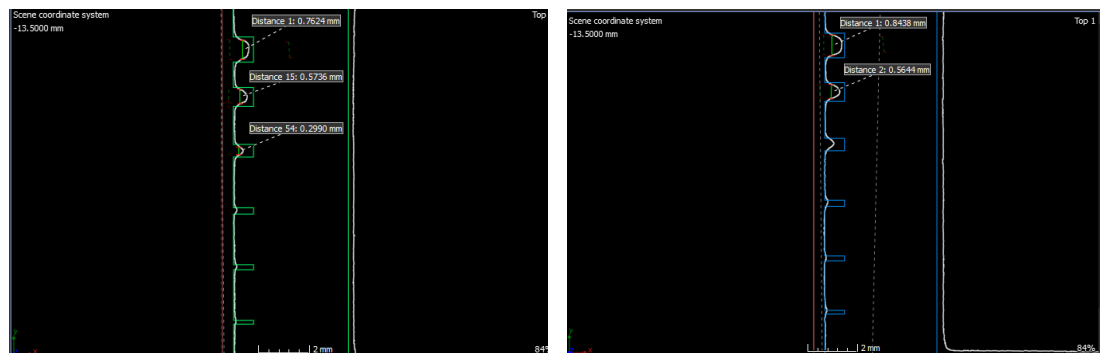


Obrázek 51: Sken Drážek

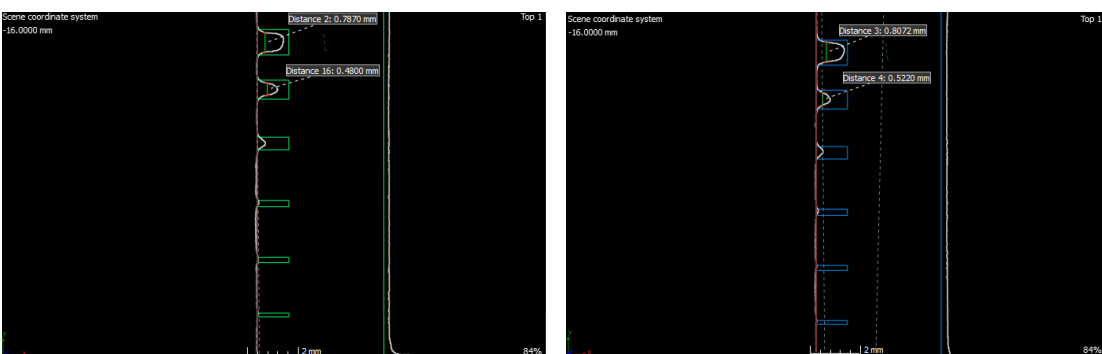
Horní drážka je zobrazena a změřena ve dvou řezech. Nejmenší se vůbec nevytiskly a pokud ano tak jsou velmi tvarově deformované. Orientační rozměry drážek jsou uvedeny v tabulce.



Obrázek 52: Řez drážek (čelní pohled)



Obrázek 53: Řez drážky v horní části



Obrázek 54: Řez drážky v dolní části

Tabulka 6: Rozměry drážek

Jmenovitá hodnota [mm]	Rozměr u rovného modelu [mm]		Rozměr u nakloněného modelu [mm]	
	horní	dolní	horní	Dolní
1,00	0,76	0,78	0,84	0,80
0,75	0,57	0,48	0,56	-

V druhé řadě u průchozích čtvercových děr jsou průchozí pouze díry jmenovitého průměru 1,00 mm o velikosti 0,63 mm u rovného artefaktu a 0,64 mm u nakloněného artefaktu.



Obrázek 55: Řez průchozích děr

Ve třetí řadě jsou čtvercové díry, u kterých se měřila pouze hloubka. U rovně orientovaného artefaktu je díra o jmenovitém rozměru 1 mm hluboká 2,49 mm, u nakloněného modelu je 2,79 mm. Díra o jmenovitém rozměru je na rovně orientovaném artefaktu hluboká 1,8 mm a na nakloněném modelu se vůbec nevytiskla. Zde můžeme vidět u nakloněného modelu póry na místech kde měla být díra vytištěná.

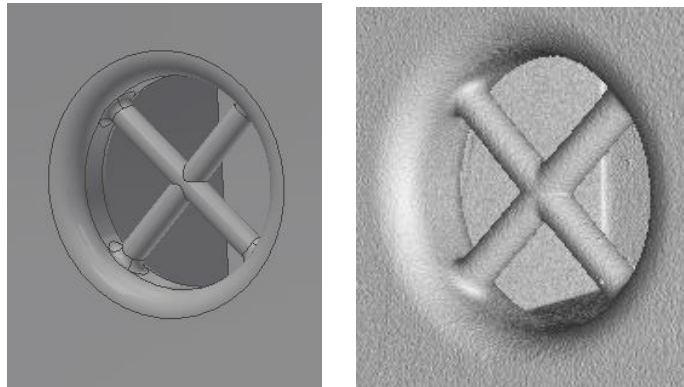


Obrázek 56: Řez třetích děr

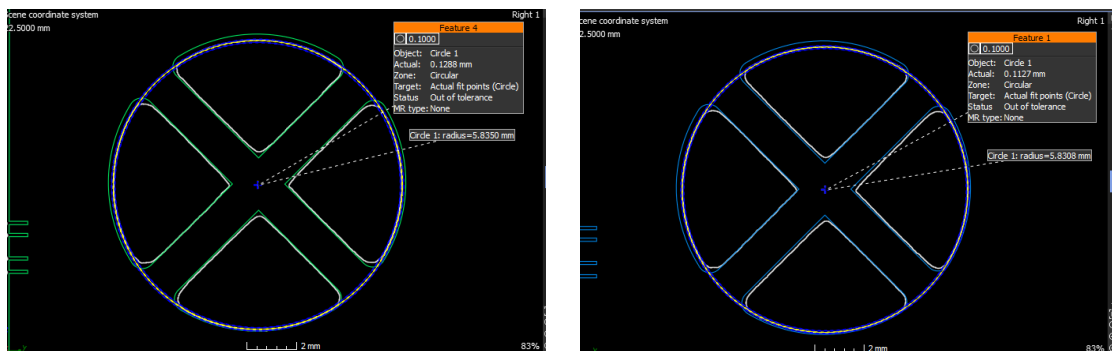


## 7.4.8 Kříž

Tento prvek obsahuje dva sloupky o průměru 0,75 mm, které se protínají ve středu kulatého výřezu o průměru 6 mm. Hlavní účel tohoto prvku je jednoduchá vizuální kontrola 2 prvků, jejichž správná poloha a tvar při tisku vedou k symetrickému protnutí. Také lze kontrolovat strukturu materiálu, zda se nevyskytují nějaké póry nebo praskliny.



Obrázek 57: Kříž

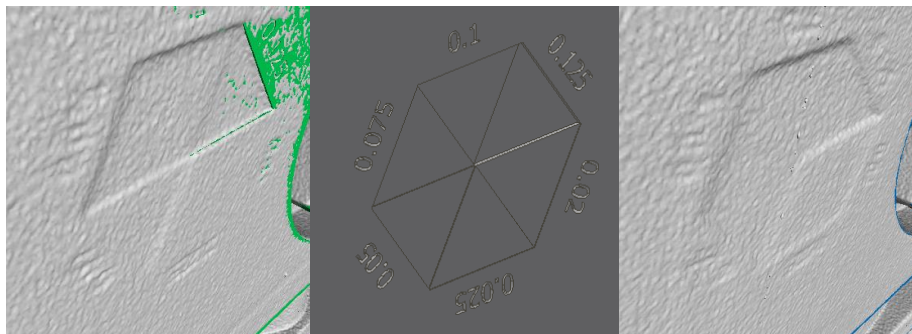


Obrázek 58: Řez kříže

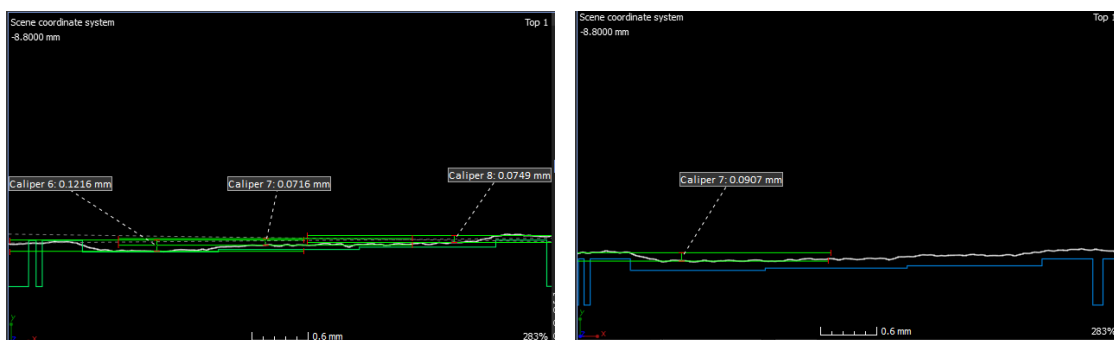
Byl změřen kulatý výřez, jež měřil u obou případů 5,83 mm a kruhovitost kde odchylka dosahovala u rovně orientovaného modelu 0,12 mm a u nakloněného 0,11 mm. Co se týče struktury materiálu, tak zde nebylo nic zpozorováno.

## 7.4.9 Prohlubující se šestiúhelík

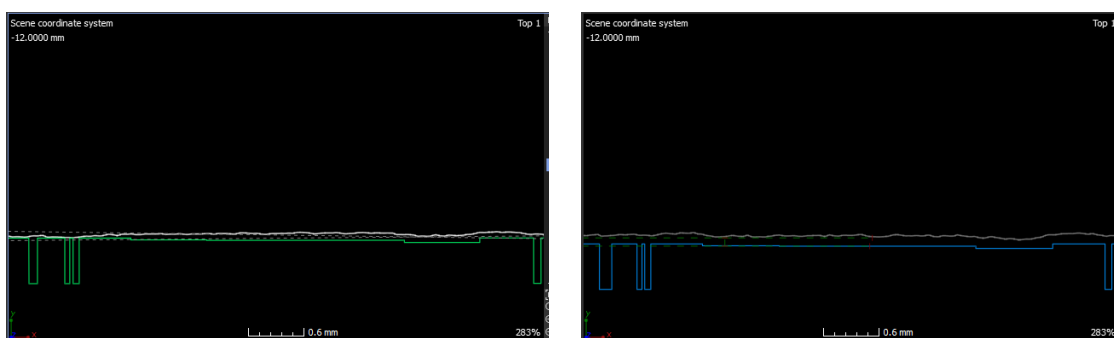
Tento úhelník se skládá ze šesti prohlubujících se segmentů od 0,02 do 1,25. Měly by být mezi nimi viditelné všechny přechody, avšak realita je jiná. Slouží pro demonstraci laterální rozlišovací schopnosti, využitelné např. pro stanovení hloubky čitelného popisování dílu. Viditelné jsou dva největší segmenty, a zbytek je téměř rovnoběžný s okolní plochou. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce.



Obrázek 59: Prohlubující se šestiúhelník



Obrázek 60: Řez šestiúhelníku (horní část)



Obrázek 61: Řez šestiúhelníku (spodní část)

Tabulka 7: Rozměry prohlubující se šestiúhelníku

Jmenovitá hodnota [mm]	Rozměr u rovného modelu [mm]	Rozměr u nakloněného modelu [mm]
0,125	0,121	0,09
0,1	0,07	-
0,75	0,075	-

V tabulce 7 můžeme vidět orientačně naměřené hodnoty. Rozměry byly těžko měřitelné z důvodu nerovnosti povrchu naskenovaného modelu. Jednotlivá prohloubení u nakloněného modelu byly slité dohromady a u rovného už byly identifikovatelné.

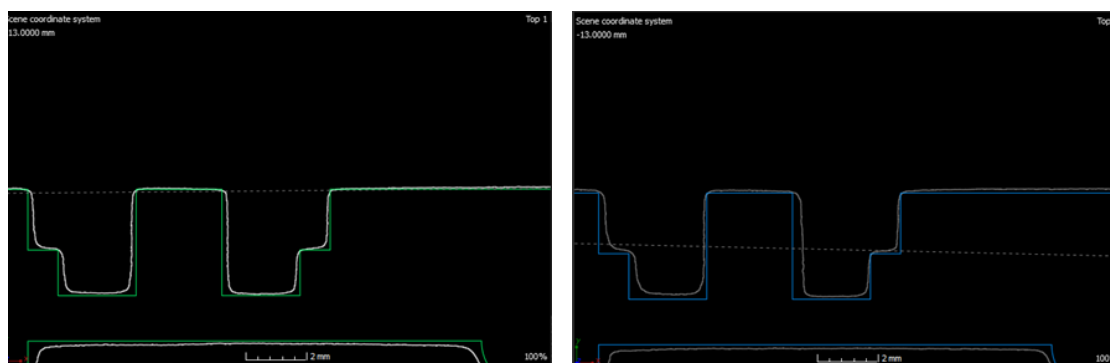
#### 7.4.10 Zkouška pro svislou plochu

Tento prvek nám ukazuje symetrické výstupky a vyhloubení umístěné ve válcové kapse. Cílem je, aby výčnělky a vyhloubení vypadaly stejně a symetricky, úhly vytvořené prvky byly jasné a stejné. Pokud kruhové vybrání a vnitřní výčnělky nejsou stejně široké a vysoké, tak to ukazuje problémy s nadměrnou expozicí.



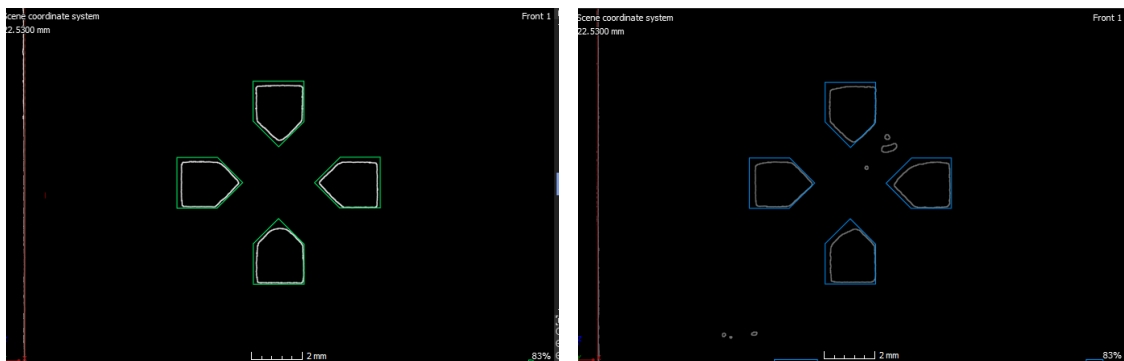
Obrázek 62: Prvek zkoušky na svislé ploše

Na pohledu shora můžeme pozorovat špatně vytisknuté ostré úhly a na artefaktu vpravo, který byl nakloněn je vidět, že výstupek uprostřed je posunut doprava.



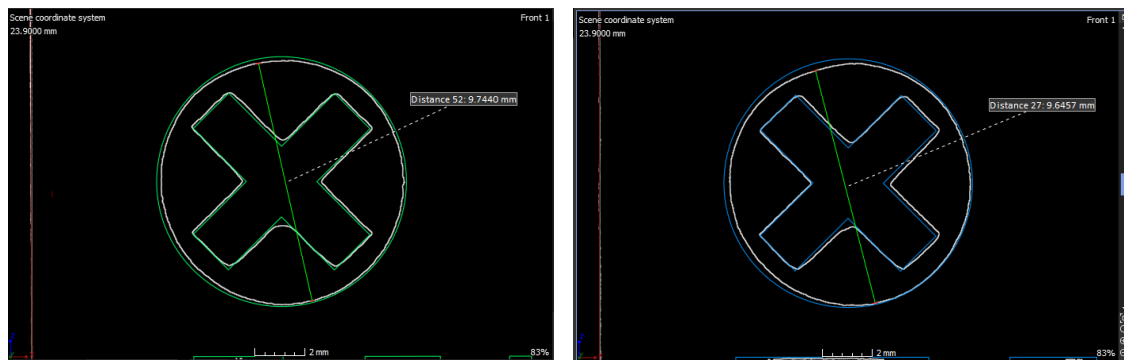
Obrázek 63: Řez prvku (pohled shora)

V tomto pohledu je taktéž vidět deformace prvku a u nakloněného modelu vpravo můžeme navíc pozorovat póry.



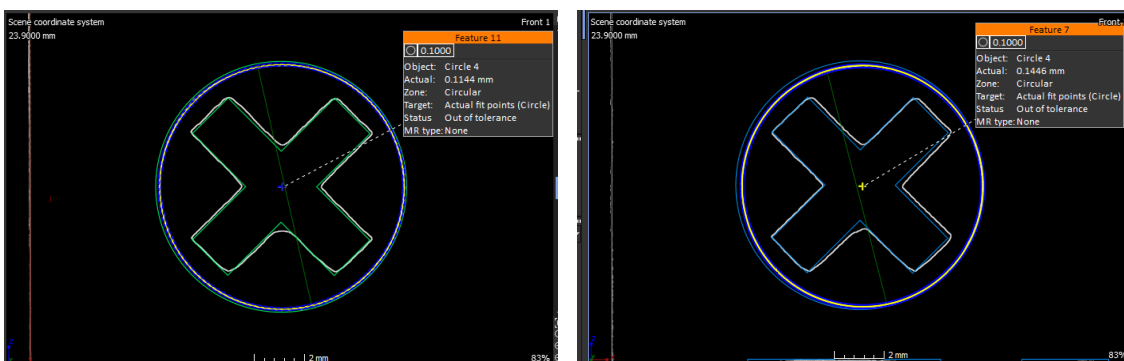
Obrázek 64: Řez prvku (pohled z boku)

Poloměr celého výřezu, jehož jmenovitá hodnota je 10 mm, ve skutečnosti měří 9,65 mm.



Obrázek 65: Řez prvku (pohled z boku)

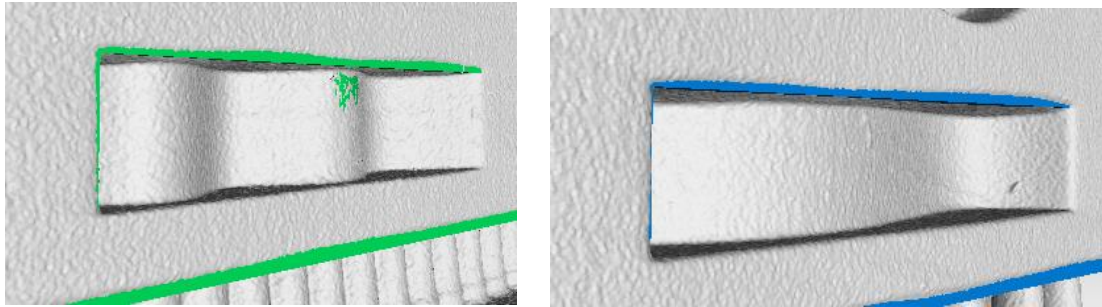
Kruhovitost tohoto prvku má odchylku u rovně orientovaného artefaktu 0,11 mm a u nakloněného 0,14 mm.



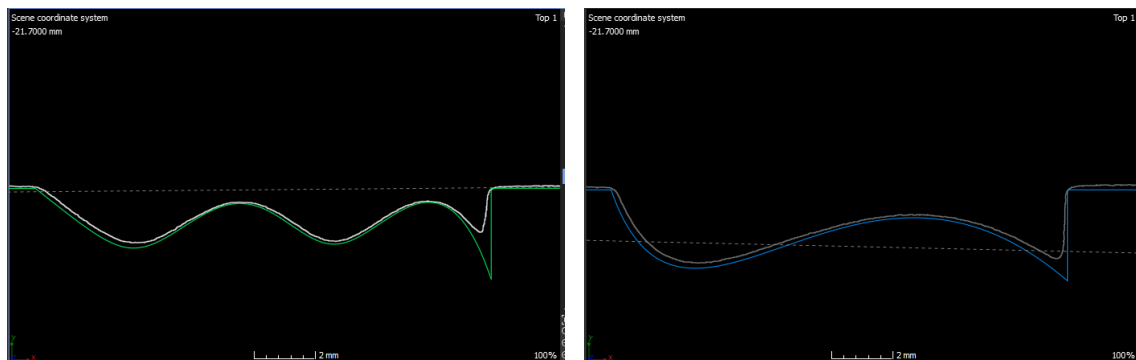
Obrázek 66: Řez prvku (kruhovitost)

### 7.4.11 Zvlňňná plocha

Tato plocha byla na každém modelu navržena jinak. Ukazuje, zda-li je vytištěná bez viditelných kroků tisku. Na pohledu v řezu vidíme, že kopíruje tvar křivky až na ostré zahloubení.



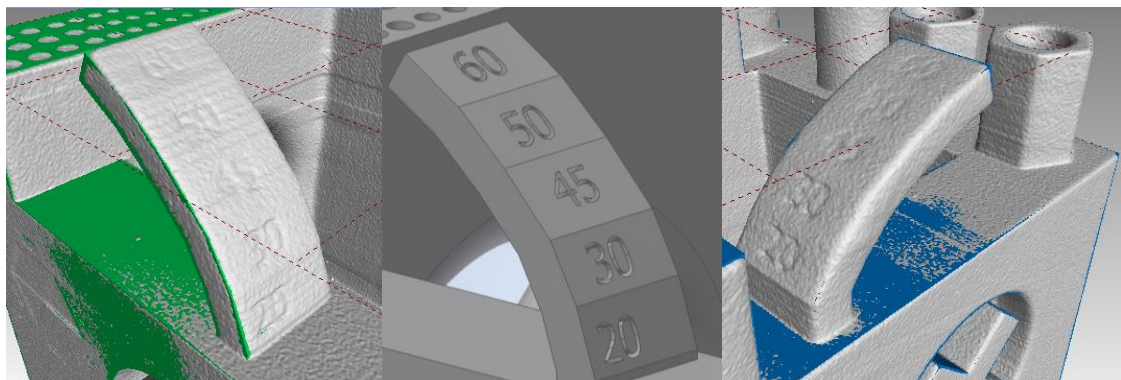
Obrázek 67: Sken zvlňňné plochy



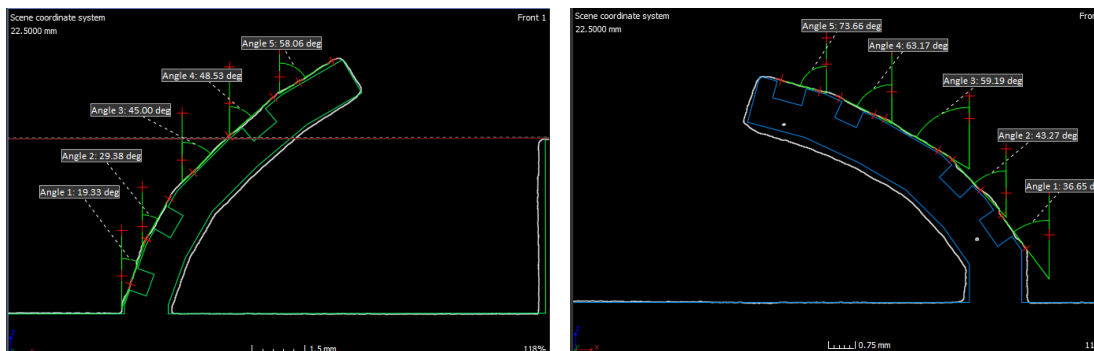
Obrázek 68: Řez zvlňňné plochy

### 7.4.12 Overhang

Zde jsme otestovali přesnost při tisku převisů bez podpor.



Obrázek 69: Sken overhangu



Obrázek 70: Řez overhangu

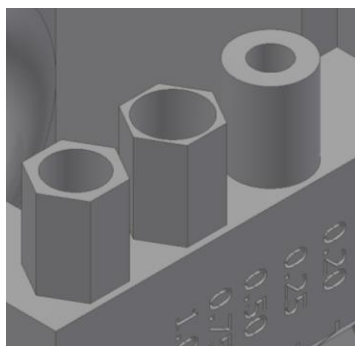
Naměřené hodnoty overhangu jsou uvedeny v tabulce 8. Rozměry nakloněného modelu jsou uvedeny po odečtení 15°, které byly zvoleny při tisku. U rovně orientovaného modelu byly úhly do 45° téměř přesné, na rozdíl od nakloněného modelu, kde právě naklonění při tisku zásadně ovlivnilo měřené úhly převisu.

Tabulka 8: Rozměry overhangu

Jmenovitá hodnota [°]	Rozměr u rovného modelu [°]	Rozměr u nakloněného modelu [°]
20	19,33	21,65
30	29,98	30,27
45	45,00	44,19
50	48,53	48,17
60	58,06	58,66

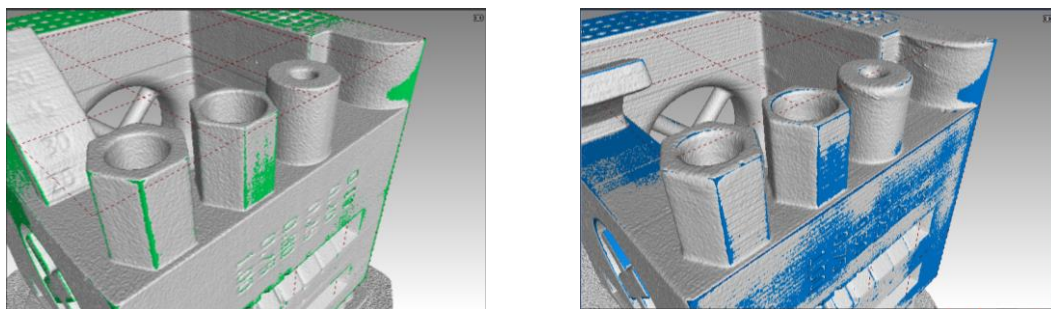
### 7.4.13 Válec a ostatní prvky

Tato zkouška je především na zkoušení válcovitosti a soustřednosti. Ostatní prvky, které jsou zobrazeny na obrázcích, slouží pouze pro vizuální kontrolu.

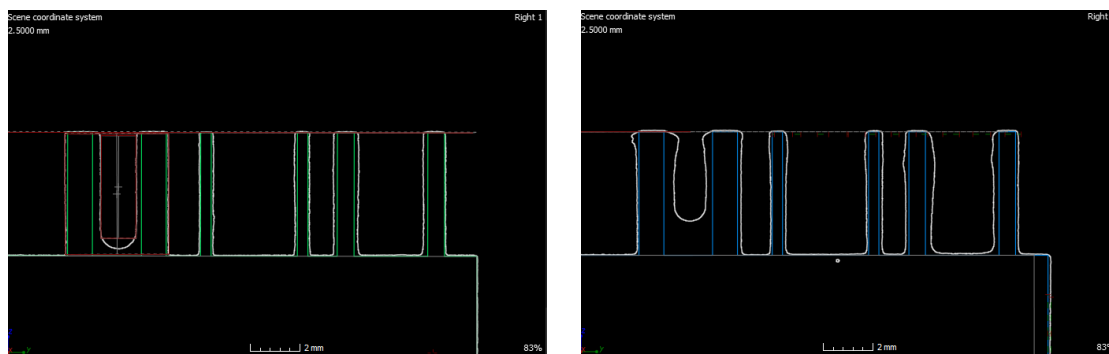


Obrázek 71: Válec a ostatní prvky (CAD model)





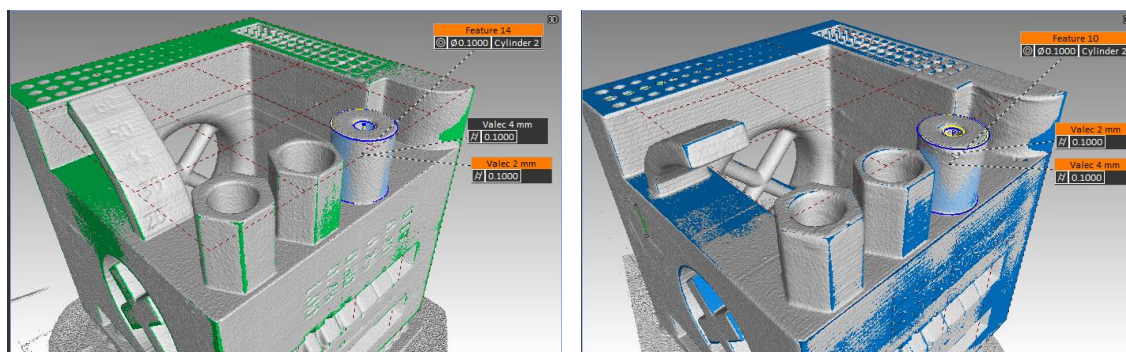
Obrázek 72: Sken válce a ostatních prvků



Obrázek 73: Řez válce a ostatních prvků (pohled z boku)



Obrázek 74: Řez válce a ostatních prvků (pohled shora)



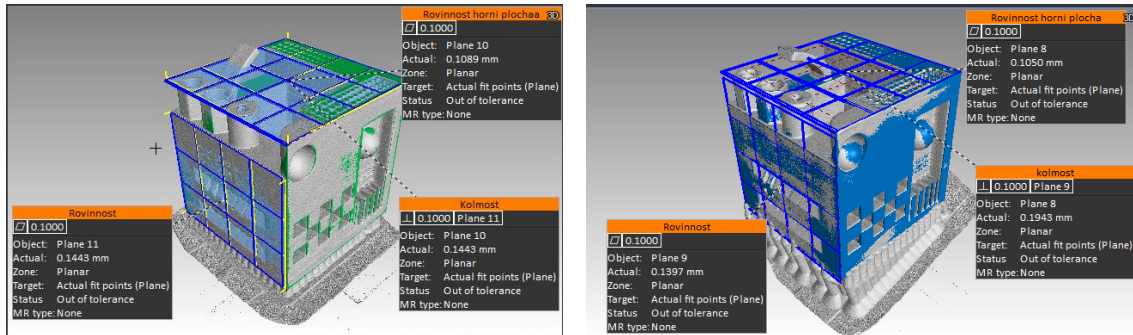
Obrázek 75: Sken válce a ostatních prvků (válcovitost)

Válec v tomto testu ukázal, že válcovitost vnějšího průměru válce (jmenovitý rozměr 4 mm), na rovně orientovaném modelu vyšel menší než 0,1 mm, na rozdíl od nakloněného válce. Zde můžeme vidět také velké deformace tvaru např. na obrázku 73. Na spodní části vnitřního prostoru válce došlo k výraznému spečení materiálu u nakloněného modelu a stěny válce se také

více zdeformovali než u rovně orientovaného modelu. U ostatních prvků můžeme zde pozorovat větší deformaci u nakloněného modelu než u rovně orientovaného.

#### 7.4.14 Chyba tvaru celkového artefaktu

Zde bylo cílem ukázat chybu tvaru celkového modelu.



Obrázek 76: Chyba tvaru modelu

Chyba tvaru jednotlivých rovin je v obou případech srovnatelná, horní rovina 0,1mm v obou případech, svislá stěna cca 0,14mm. Chyba směru, těchto dvou rovin vůči sobě, tzn. chyba kolmosti je cca o 30% horší u dílu tisknutého pod sklonem.



## 8 Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na 3D tisk, jeho principy a zkoušky přesnosti. Cílem této práce bylo ukázat jaké jsou technologické možnosti 3D tisku metodou SLA/DLP, pomocí navrhnutého artefaktu.

V první části práce byl charakterizován 3D tisk jako takový a následně popsán současný přehled metod 3D tisku. Existuje celkem 7 základních kategorií, které se rozdělují na další podkategorie. Dále bylo popsáno zkoušení přesnosti na artefaktech pro metody SLA/DLP a jak by měl být navržen takový artefakt.

V druhé části byl vytisknut navržený artefakt ve dvou polohách a následně porovnán. Pro vyhodnocení byla použita počítačová tomografie, která slouží k nedestruktivnímu způsobu testování součástí. Měření prvků, které bylo prováděno v jednotlivých řezech artefaktu, je orientační, protože musíme brát v úvahu chyby měření ovlivněné procesem skenování jako je okolní šum, nebo nečistoty. Po změření každého prvku z navrhnutého artefaktu bylo vyhodnoceno, že ačkoli zvolená metoda tisku CDLP, která je založena na stereolitografii, není tak přesná, jak uvádějí odborníci. Pokud se jedná o malé prvky modelu v řádu setin, nemůžeme absolutně spoléhat, že tvar bude totožný s navrženým modelem. Pokud rozměry prvků modelu jsou navrženy v řádu desetin, výsledky se jeví lepší. Po porovnání odlišně orientovaných artefaktů můžeme konstatovat, že pokud je součást nakloněná o určitý stupeň, má to vliv na geometrické tolerance, jako je rovinnost nebo kolmost celého modelu. U nakloněného modelu o 15° jsme mohli pozorovat větší odchylky tvaru, deformace, a navíc vzduchové bubliny, póry v materiálu, což nepříspěvá ke kvalitě artefaktu. U kulovitých nebo zaoblených ploch však nedošlo téměř k žádné změně tvaru.

Technologie CDLP poskytuje tisk s dobrým rozlišením modelů, pokud uvážíme pořizovací náklady, ovšem parametry přístroje jako je rozlišení 47 $\mu$ m v XY, které odpovídá rozlišení LCD displeje, je nereálné dosáhnout na výsledných dílech a je nutné tyto parametry brát s velkou rezervou. Na jednotlivých analyzovaných prvcích artefaktu

je provedeno orientační měření ve vybraných místech, nicméně již z grafického vyhodnocení chyb jsou patrné na malých prvcích a geometriích někdy velice výrazné rozdíly, mezi jmenovitými geometriemi a reálným dílem. Dále uvedená přesnost přístroje v ose Z je 0,00125 mm, což se nám nepodařilo dokázat. Díry, umístěné na horní části modelu, se nepodařilo vytisknout ani o průměru 1,00 mm.

Možnost technologie 3D tisku založené na stereolitografii je dobré používat u modelů, kde jmenovité rozměry jsou navrženy o velikosti desítek až stovek milimetrů a lze očekávat přesnost tisku jednotlivých prvků v řádu desetin milimetrů mnohdy i 0,5mm.

## 9 Zdroje

- [1] GIBSON, Ian, David ROSEN a Stucker BRENT. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2015. ISBN 978-1-4939-2113-3.
- [2] STEVEN, Brant. 5 Major Benefits of Additive Manufacturing You Should Consider. *CMTC Manufactuirng blog* [online]. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.cmtc.com/blog/author/steven-brand>
- [3] ATTARAN, Mohsen. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,. *Business Horizons* [online]. 2017, s. 677-688 [cit. 2020-12-02]. ISBN 0007-6813. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681317300897>
- [4] *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today* [online]. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [5] *Historie 3D tisku* [online]. In: [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/sikorovape/home/historie-3d-tisku>
- [6] The Free Beginner's Guide: History of 3D Printing. *3D printing industry* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>
- [7] GOLDBERG, Dana. History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30). *Redshift* [online]. 13.4.2018 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>
- [8] KONDO, Hironori. *Vat Polymerization: What Are SLA, DLP, and LCD?* [online]. 6.12.2019 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/vat-polymerization-what-are-sla-dlp-and-lcd/>
- [9] Material jetting. Engineering product design [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>
- [10] BERÁNEK Libor. *Aditivní a alternativní technologie*. Praha 2018

- [11] The 7 Categories of Additive Manufacturing. Loughborough University [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [12] KATZ, Barry. Instant manufacturing [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <http://tuyunwen.com/instant-manufacturing-research/65670c9shzjmf3hrgepywpqh6ooh9m>
- [13] The future of 3D printing. *Fastener news* [online]. 5.5.2018 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.fastenernewsdesk.com/21142/the-future-of-3d-printing/>
- [14] REDWOOD, Ben. Additive manufacturing technologies: An overview. 3D hubs [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>
- [15] SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers. Formlabs [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>
- [16] Impressive calibration part for resin 3D printers together with the guide on how to understand its features. Ameralabs [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://ameralabs.com/blog/town-calibration-part/>
- [17] Transformation In 3D: How A Walnut-Sized Part Changed The Way GE Aviation Builds Jet Engines [online]. 19.11.2018 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.ge.com/news/reports/transformation-3d-walnut-sized-part-changed-way-ge-aviation-builds-jet-engines>
- [18] *Historie 3D tisku* [online]. In: [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/sikorovape/home/historie-3d-tisku>
- [19] 3D printing. *3D hubs* [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [20] MOYLAN, Shawn, April COOKE, Kevin JURRENS a John SLOTWINSKI. *A Review of Test Artifacts for Additive Manufacturing*. 2012. ISSN National Institute of Standards and Technology.
- [21] Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems: Active Standard ASTM ISO/ASTM52902. COMPASS. Dostupné z: [https://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?ISOASTM52902+19](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?ISOASTM52902+19)

- [22] PIRES, Ricardo. *SLA vs DLP: The Differences – Simply Explained* [online]. 12.10.2019 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/>
- [23] PEELS, Joris. *A New 3D Printing Benchmark: A Danish Artifact the DTA* [online]. 2018 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://3dprint.com/222253/a-new-3d-printing-benchmark-a-danish-artifact-the-dta/>

## 10 Seznam obrázků a tabulek

### 10.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Aditivní technologie [8].....	9
Obrázek 2: Závislost nákladů na tvarové náročnosti [10] .....	10
Obrázek 3: Palivová tryska (tištěná část uvnitř propíchnuté prstencové části vpravo) [17] .....	11
Obrázek 4: Stereolitografický stroj SLA-1 [5] .....	12
Obrázek 5: Přehled technologií 3D tisku [14] .....	14
Obrázek 6: VAT Photopolymerisation [25] .....	15
Obrázek 7: Srovnání technologií SLA, DLP, CDLP [8].....	16
Obrázek 8: Material extrusion [11] .....	17
Obrázek 9: Material Jetting [11] .....	18
Obrázek 10: Binder Jetting [11].....	19
Obrázek 11: Power bed fusion [25].....	20
Obrázek 12: Directed energy deposition [11].....	23
Obrázek 13: Sheet lamination [11] .....	23
Obrázek 14: Porovnání SLA a DLP [22].....	25
Obrázek 15:Kvalita povrchu SLA vs. DLP [22].....	26
Obrázek 16: Zkušební artefakt [20].....	27
Obrázek 17: Testovací artefakt [20].....	28
Obrázek 18: Zkušební artefakt se spirálou [23] .....	28
Obrázek 19: Zkušební artefakt AMERALABS [16].....	28
Obrázek 20: Rozložení artefaktů v softwaru Chitubox .....	33
Obrázek 21: Vytisknuté artefakty .....	33
Obrázek 22: Histogram s rovinou isosurface .....	34
Obrázek 23: Analýza odchylek tvaru artefaktů (pohled A) .....	35
Obrázek 24: Analýza odchylek tvaru artefaktů ((pohled B) .....	35
Obrázek 25: Analýza odchylek tvaru artefaktů (pohled C) .....	36
Obrázek 26: Analýza tvaru odchylek artefaktů (pohled D) .....	36
Obrázek 27: Analýza tvaru odchylek.....	37
Obrázek 28: Sloty .....	37
Obrázek 29: Sken slotů.....	38
Obrázek 30: Šachovnice (CAD model).....	39
Obrázek 31: Sken šachovnice (3D pohled).....	39
Obrázek 32: Řez šachovnice (rozměry) .....	39
Obrázek 33: Řez šachovnice (hloubka) .....	40
Obrázek 34: Řez šachovnice (kolmost) .....	40
Obrázek 35: Šachovnice (rovnoběžnost).....	40
Obrázek 36: Polokoule .....	41
Obrázek 37: Sken polokoule v řezu.....	41
Obrázek 38: Sken polokoule (chyba tvaru) .....	42
Obrázek 39: Dutá polokoule .....	42
Obrázek 40: Sken duté polokoule (kruhovitost) .....	43
Obrázek 41: Sken duté polokoule (tloušťka stěny) .....	43
Obrázek 42: Piny (CAD model).....	43

Obrázek 43: Sken pinů (rovně orientovaný model) .....	44
Obrázek 44: Sken pinů (nakloněný model) .....	44
Obrázek 45: Řez pinů .....	44
Obrázek 46: Díry (CAD model) .....	45
Obrázek 47: Sken děr .....	45
Obrázek 48: Řez děr (pohled z boku) .....	45
Obrázek 49: Řez děr (pohled shora).....	45
Obrázek 50: Drážky (CAD model) .....	46
Obrázek 51: Sken Drážek.....	47
Obrázek 52: Řez drážek (čelní pohled).....	47
Obrázek 53: Řez drážky v horní části.....	47
Obrázek 54: Řez drážky v dolní části .....	47
Obrázek 55: Řez průchozích děr.....	48
Obrázek 56: Řez třetích děr.....	48
Obrázek 57: Kříž .....	49
Obrázek 58: Řez kříže .....	49
Obrázek 59: Prohlubující se šestiúhelník .....	50
Obrázek 60: Řez šestiúhelníku (horní část) .....	50
Obrázek 61: Řez šestiúhelníku (spodní část).....	50
Obrázek 62: Prvek zkoušky na svislé ploše .....	51
Obrázek 63: Řez prvku (pohled shora).....	51
Obrázek 64: Řez prvku (pohled z boku) .....	52
Obrázek 65: Řez prvku (pohled z boku) .....	52
Obrázek 66: Řez prvku (kruhovitost).....	52
Obrázek 67: Sken zvlněné plochy.....	53
Obrázek 68: Řez zvlněné plochy.....	53
Obrázek 69: Sken overhangu .....	53
Obrázek 70: Řez overhangu .....	54
Obrázek 71: Válec a ostatní prvky (CAD model) .....	54
Obrázek 72: Sken válce a ostatních prvků.....	55
Obrázek 73: Řez válce a ostatních prvků (pohled z boku) .....	55
Obrázek 74: Řez válce a ostatních prvků (pohled shora) .....	55
Obrázek 75: Sken válce a ostatních prvků (válcovitost).....	55
Obrázek 76: Chyba tvaru modelu.....	56

## 10.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Specifikace tiskárny ANYCUBIC Photon S .....	32
Tabulka 2: Rozměry slotů .....	38
Tabulka 3: Rozměry šachovnice .....	41
Tabulka 4: Rozměry pinů.....	44
Tabulka 5: Rozměry děr .....	46
Tabulka 6: Rozměry drážek .....	48
Tabulka 7: Rozměry prohlubující se šestiúhelníku .....	51
Tabulka 8: Rozměry overhangu.....	54