

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ZKUŠEBNÍ METODY PRO HODNOCENÍ KVALITY TECHNOLOGIÍ
3D TISKU

TEST METHODS FOR EVALUATING THE QUALITY OF 3D
PRINTING TECHNOLOGIES

AUTOR: Petr Hála

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: **Hála** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **473691**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zkušební metody pro hodnocení kvality technologií 3D tisku

Název bakalářské práce anglicky:

Test methods for evaluation of the quality of 3D printing technologies

Pokyny pro vypracování:

Technické normy popisující metody hodnocení přesnosti 3D tisku v rámci ISO/TC 261.

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 druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval 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. Také bych rád poděkoval Petrovi Dvořákovi z Prusa Research za poskytnutí tiskáren a materiálů a pomoc s výtisky.

Anotace

Bakalářská práce zabývající se technologiemi 3D tisku. Pojednává o principech, výhodách a nevýhodách a zkoušení přesnosti. Ve větší míře je zaměřena na vytvoření zkušebního artefaktu pro tiskárny technologií FDM a DLP.

V práci je zpracován návrh, vývoj, tisk a následné vyhodnocení zkušebního artefaktu ve třech verzích na třech různých tiskárnách a analýza odchylek a porovnání s nominálním modelem v programu VG Studio Max. Vyhodnocení je uděláno jak pro tvarové odlišnosti a tolerance, tak i z hlediska technicko-ekonomického pohledu.

Klíčová slova: 3D tisk, aditivní výroba, zkušební artefakt, vývoj artefaktu, výpočetní tomografie

Annotation:

The Bachelor thesis is focused on 3D printing technologies. It discusses the principles, advantages and disadvantages, and accuracy testing. It is more focused on creating a test artifact for FDM and DLP printers.

The thesis introduces the design development, printing and subsequent evaluation of the test artifact in three versions on three different printers and analysis of deviations and comparison with the nominal model in the program VG Studio Max. The evaluation is made both for shape differences and tolerances, and also from a technical and economic point of view.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, test artifact, artifact development, computed tomography

Seznam použitých symbolů a zkratek

3D – Trojrozměrný

CAD – Computer aided design

AM – Additive manufacturing

NIST – National Institute of Standards and Technology

SLA – Stereolithography

LOM – Laminated Object Manufacturing

FDM – Fused deposition modeling

FFF – Fused filament fabrication

DLP – Digital Light Processing

SLS – Selective laser Sintering

SLM – Selective laser melting

LOM – Laminated object manufacturing

EBM – Electron Beam Melting

CT – Computed Tomography

mm – milimetr

nm – nanometr

μm – mikrometr

UV – Ultrafialové záření

μA – mikroampér

ms – milisekunda

Obsah

1. Úvod	9
2. Výhody a nevýhody 3D tisku	10
2.1. Výhody	10
2.2. Nevýhody	11
3. Historie 3D tisku.....	13
4. Vybrané technologie 3D tisku.....	15
4.1. FDM (FFF).....	15
4.2. SLA.....	16
4.3. DLP	17
4.4. SLS a SLM	18
4.5. LOM	19
4.6. BJ	21
4.7. EMB a ostatní technologie 3D tisku.....	22
5. Technické normy popisující metody přesnosti 3D tisku.....	23
5.1. ISO/ASTM 52902:2019 – Testovací artefakty	23
5.2. ISO 27547-1:2010 – Plasty a příprava zkušebních vzorků termoplastických materiálů.....	25
5.3. ISO 17296-3:2014 – Obecné zásady aditivní výroby a hlavní charakteristiky a odpovídající zkušební metody	26
5.4. ISO/ASTM 52900:2015 – Obecné zásady terminologie aditivní výroby	26
6. Zkušební artefakty využívané dle technologií 3D tisku	27
6.1. Zkušební artefakt	27
6.2. Pravidla pro zkušební artefakty	28
6.3. Zkušební artefakty pro jednotlivé aplikace	29
6.4. Zkušební artefakty pro porovnání systémů AM a použitých technologií... ..	30
6.5. Zkušební artefakty pro vyhodnocování konkrétních systémů	30
7. Návrh a vývoj zkušebního artefaktu	32

7.1.	Návrh artefaktu	33
7.2.	Vývoj artefaktu	35
8.	Realizace tisku na vybraných FDM a DLP tiskárnách	37
8.1.	Original Prusa MINI+	37
8.2.	Original Prusa I3 MK3S+	39
8.3.	Anycubic Photon S	42
9.	Vyhodnocení zkušebních těles	45
9.1.	Analýza odchylek tvaru	46
9.2.	Kruhová část	50
9.3.	Polokoule	51
9.4.	Vlna	52
9.5.	Válce	55
9.6.	Sloty	57
9.7.	Otvory	60
9.8.	Lattice structure	61
9.9.	Stavební jehlany	64
10.	Technicko-ekonomické vyhodnocení	67
11.	Závěr	69
12.	Zdroje	70
13.	Seznam obrázků a tabulek	73
13.1.	Seznam obrázků	73
13.2.	Seznam tabulek	75

1. Úvod

V bakalářské práci se zabývám 3D tiskem a jeho technologickými a ekonomickými možnostmi. Především se zaměřuji na technologie FDM a DLP a na vývoj artefaktu pro obě zmíněné technologie. Nejdříve práce ukazuje nejrozličnější technologie 3D tisku, jejich principy, historii a zkoušení přesnosti. Poté se zabývá ukázkou testovacích artefaktů. Druhá část je zaměřena na navržení vlastního testovacího artefaktu, měření pomocí CT a na analýzu výsledků a porovnání tiskáren mezi sebou.

Za posledních několik let zažil 3D tisk ohromný rozmach. Objevily se nejrozličnější aplikace 3D tiskáren v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, medicíně, architektuře a i umění. V neposlední řadě jsou dnes 3D tiskárny dostupné i pro jednotlivé domácnosti a kutily. Aditivní výroba či 3D tisk je proces, během kterého se z předem stanoveného digitálního 3D modelu (digitální předlohy) vytváří model fyzický. K dispozici máme mnoho softwarových nástrojů pro vytváření 3D objektů od průmyslových po volně dostupné. Když je 3D objekt připravený, je dalším krokem příprava nastavení dané technologie. Tomuto kroku se říká slicing (krájení) při čem se model rozdělí na tisíce vrstev tisku a nakonfiguruje na předem specifikovanou technologii. Pokud je model nakrájený, soubor se přenesení pomocí USB, SD či Wi-Fi do tiskárny. Vrstvy materiálu se poté na sebe jednotlivě nanášejí spékáním a tavením či se případně vytvrzují pomocí UV záření nebo reakcí s lepidly. U procesu aditivní výroby se nevyskytuje téměř žádný odpad a možnosti tvarování modelu jsou vcelku neomezené. Opakem aditivní výroby je například CNC obrábění nebo vrtání, kdy se setkáváme s odběrem materiálu a s odpadem při použití technologie. [5] [6] [8]

2. Výhody a nevýhody 3D tisku

Přesto, že poptávka po 3D tisku roste i tato technologie má své výhody a nevýhody které je potřeba zohledňovat do konkrétních aplikací. [9] [13]

2.1. Výhody

Mezi největší výhody 3D tisku patří především spojení rychlého designu, šetření času a snížení nákladů. [9]

- Flexibilní design – Tradiční technologické procesy mají ve většině případů konstrukční omezení. 3D tisk umožňuje návrh a vytváření složitějších objektů v přímém čase. [9] [13]
- Rapid Prototyping – Díky tomu, že technologie 3D tisku jsou schopny vytisknout díly v rámci hodin, tak pomáhá k rychlejšímu dokončování fází prototypů. V porovnání s prototypy obrábění je 3D tištěný objekt rychlejší a levnější na výrobu. Následně je každá konstrukční úprava efektivnější. [9] [13]
- Rychlý design – 3D tisk může nabídnout úsporu času nejen při výrobě dílů, ale také návrhový proces může být velmi rychlý pomocí vytváření STL souborů přímo generovaných z CAD softwarů. [9]
- Minimální odpad materiálu – Výroba 3D tištěných dílů vyžaduje pouze materiály potřebné pro samotný objekt. Alternativní metody jsou vyřezávány z velkých kusů někdy nerecyklovatelných materiálů oproti tomu 3D tisk plýtvá materiál pouze minimálně nebo vůbec. Proces nejen šetří zdroje, ale také snižuje náklady. [9] [13]
- Jednoduchá dostupnost – 3D tiskárny jsou stále dostupnější jak pro průmyslové korporace, tak i pro koncové uživatele. Nevyžadují drahé náklady na údržbu ani dopravu a montáž. [9] [15]
- Výhodnější náklady na stroj – 3D tisk jako jednostupňový výrobní proces šetří čas a tím i náklady spojené s používáním různých strojů ve výrobě. Lze také nastavit 3D tiskárny a nechat je, aby pokračovaly v práci, z čehož plyne, že operátoři nemusí být celou dobu přítomni u

stroje. Někdy může být samotný nákup 3D tiskárny nákladný, lze projekty zadat jiné společnosti poskytující služby 3D tisku. [9] [15]

- Materiál dílu – I když se používají některé kovy, nejčastěji používaným materiálem pro 3D tisk je plast. Plasty jsou lehčí než jejich kovové ekvivalenty, a to nese značné výhody v automobilové a leteckém průmyslu, kde je problém s nízkou hmotností. Díly se také vytvářejí z materiálů na míru, aby poskytly specifické vlastnosti jako je např. tepelná odolnost a vyšší pevnost. [9] [13]
- Šetrnost k životnímu prostředí – Jak bylo zmíněno výše 3D tisk neplýtvá skoro žádný materiál a tím je šetrný k životnímu prostředí, tím že se nemusí zbytky recyklovat. Ekologické výhody má například, když vezmeme v úvahu lepší účinnost paliva při používání odlehčených 3D tištěných dílů. [9]

2.2. Nevýhody

Mezi nevýhody této technologie patří především kombinace omezení materiálů, které lze tisknout, a především omezená velikost dílu. [9] [13]

- Omezené materiály pro tisk – 3D tisk vytváří díly ze skupin plastů a kovů, ale dostupný výběr materiálů je omezený. To je způsobeno tím, že ne u všech kovů a plastů lze dostatečně regulovat teplotu, umožňující 3D tisk. Mnoho z těchto materiálů navíc nejde recyklovat a jen některé z nich jsou bezpečné pro potravinářský průmysl. [9] [13]
- Omezená velikost dílů – V současné době mají 3D tiskárny malý tiskový prostor, který omezuje velikost tištěných dílů. Větší tělesa se tisknou po samostatných částech a poté se spojují dohromady. To u větších dílů zvyšuje náklady a čas operátora. [9] [13]
- Post Processing (následné zpracování) – Jak se uvedeno výše, ačkoli 3. velké části vyžadují následné zpracování, tak i většina 3D tištěných dílů vyžaduje určitou formu čištění a povrchových úprav. Je to z důvodu odstranění podpůrných materiálů z konstrukce a aby se dosáhlo požadované povrchové přesnosti. Mezi tyto metody patří např. tryskání vodou, broušení, chemické namáčení a máchání, sušení

vzduchem nebo teplem a montáž. Množství úsilí, které musíme věnovat následnému zpracování závisí na velikosti vyráběného dílu, zamýšlené aplikaci a typu použité technologie 3D tisku. Následným zpracováním lze tedy rychlost výroby zpomalit. [9] [13]

- **Struktura dílů** – Jak bylo dříve zmíněno, 3D tisk vyhotovuje díly po vrstvách. Když se tyto vrstvy k sobě přilnou, znamená to, že se mohou za určitých napětí nebo orientací delaminovat. Tento problém je nejčastější u technologie FDM. Proto je v některých aplikacích lepší použití technologie vstřikování, aby se vytvářela homogenní část, která se nerozdělí a nezlomí. [9]
- **Velké množství dílů** – U technologie 3D tisku je cena výroby na kus statická na rozdíl od běžnějších technologií (např. vstřikování), kde může být výroba velkých objemů nákladově efektivnější. Počáteční investice do 3D tisku bývá nižší než u jiných technologií, pokud se ale zvýší objem výroby, náklady značně rostou. [9]
- **Výrobní přesnost** – Další potenciální problém s 3D tiskem přímo souvisí s typem použité tiskárny nebo procesu. Některé tiskárny mají nižší tolerance, čím se může lišit finální díl od původního návrhu. To lze opravit při následném obrábění, pokud máme k dispozici dostatečné přídatky, ale to nadále jen zvyšuje čas a náklady. [9] [13]

3. Historie 3D tisku

Přestože 3D tisk zažívá ohromný rozmach až v poslední letech, jedná o se o technologii z druhé poloviny 20. století. Přibližně do 80. let neměly technologie aditivní výroby v průmyslovém kontextu žádnou praktickou aplikaci s výjimkou výroby mikročipů. Roku 1984 patentoval Chuck Hull technologii stereolitografie (SLA), o dva roky později založil společnost 3D System zabývající se výrobou a prodejem těchto SLA strojů. Technologie SLA používá k způsobu tisku vykreslování ultrafialovým laserovým paprskem, který na hladině polymerové pryskyřice vytvoří objekt. I když v té době patent této technologie otevřel možnosti pro širokou veřejnost, stále se nemluvílo o „3D tisku“ jako takovém. Koncem 80. let 20. století byla vyvinuta technologie Laminated Object Manufacturing (LOM). Principem technologie je, že vrstvy dílu se řezají z papíru pomocí laseru. Na papír se poté na spodní straně roztaví plastový povlak. Aplikace této technologie nebyly v průběhu let nijak zvlášť úspěšné. Mezi výrobce patřily např. Helisys v USA, Kira v Japonsku a Solido3D v Izraeli. Chronologicky další patentovanou technologií byla Selective Laser Sintering (SLS) vyvinutá na Texaské univerzitě v roce 1989. SLS sestává z tavení částic prášku pomocí laserového paprsku. Po výrobě akademických strojů patent koupila startupová společnost DTM Co., která začala vyrábět stroje pro komerční použití. Výroba byla ve spolupráci se společností 3D Systems, kterou následně roku 2001 odkoupila. Nejznámější technologie 3D tisku Fused Deposition Modeling (FDM) vyvinul už na konci 80. let. C.S.Crump. Technologii založenou na nanášení termoplastického materiálu vrstvu po vrstvě pomocí 3osého robota si nechal patentovat v roce 1992 a založil společnost Stratasys Inc. Společnost Stratasys se v roce 2012 spojila se společností Objet Ltd, jedním z předních výrobců 3D tiskáren se sídlem v Izraeli. FDM se poté stalo výrobní technologií, na kterou se většina stolních tiskáren spoléhá. [6] [10] [11]

Až do počátku 21. století se 3D tiskárny braly pouze jako drahé stroje používané hlavně v průmyslových odvětvích pro vytváření prototypů. Až v roce 2005 A. Bowyer na Univerzitě v Bath začal projekt, jehož cílem bylo

poskytnout jednotlivcům levné open-source tiskárny. Projekt nesl název Rep Rap (Replicating Rapid Prototyping). Tiskárna Rep Rap fungovala na principu FFF (Fused Filament Fabrication) odvozeného z FDM. Hardware i software byly open-source, včetně elektroniky založené na platformě Arduino. Tato tiskárna měla oslovit širokou veřejnost a komunity DIY (Do it yourself) a Makers, kteří byli vyzváni, aby vytvářeli a upravovali své vlastní modely. Na reakce na projekt Rep Rap vznikla v roce 2016 v New Yorku společnost MakerBot Industries, která poskytuje kutilské znalosti pro kohokoliv, kdo má jen základní technické dovednosti. Tato společnost se postupným vývojem dostala z otevřeného do uzavřeného zdrojového hardwaru a v roce 2013 jí odkoupila společnost Stratasys Inc. V roce 2000 také začali vznikat nová hnutí zabývající se 3D tiskem. Mezi nejznámější patří FabLabs zkrácenina spojení Fabrication Laboratories. Jednalo se o komunitu tvůrců, která začala organizovat výstavy s názvem Makers Faires, které se pořádají dodnes. V dnešní době je 3D tisk rozšířen jak v průmyslové výrobě, tak hlavně mezi kutily. Obrovský boom dnes zažívá ve východních zemích, hlavně Japonsku Jižní Koreji a především Číně. V České republice je momentálně jedním z nejlepších světových výrobců především cenově dostupných tiskáren Josef Průša s jeho společností Prusa Research. [10] [11]

4. Vybrané technologie 3D tisku

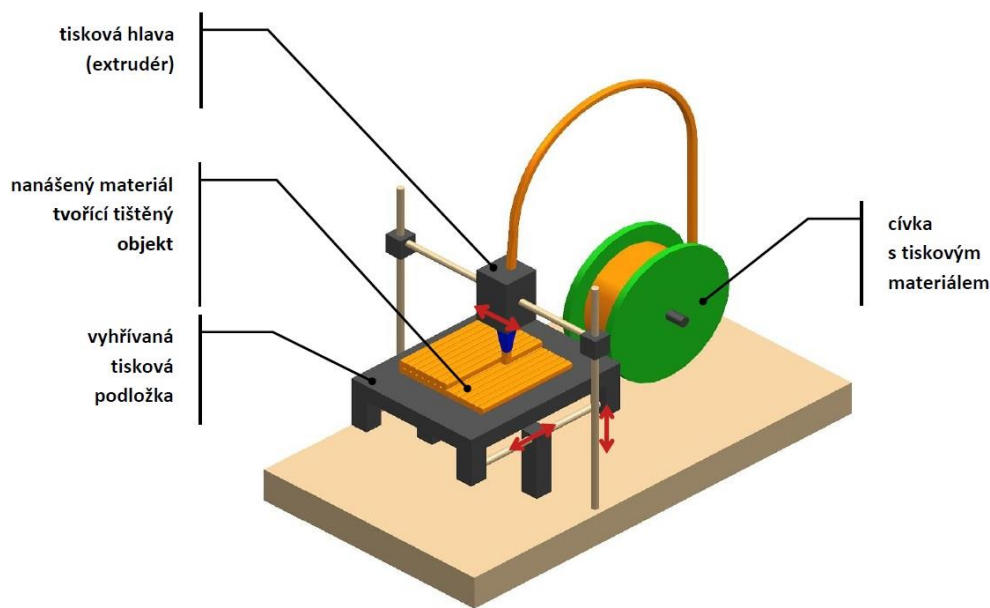
V této kapitole je výběr nejznámějších technologií 3D tisku. Výběr je zaměřený jak na komerční, tak i uživatelsky dostupné technologie. Nadále jsou v přehledu zastoupeny i termoplasty, reaktoplasty a sloučeniny kovů.

4.1. FDM (FFF)

Principem této technologie je odvíjení termoplastického vlákna tzv. filamentu (nejčastěji o průměru 1,75 nebo 3,00 mm) z cívky. Toto vlákno se přivádí do horké trysky, která je regulovaná jednotkou pro regulaci teploty a ve stavu viskózního toku se vytlačuje extrudérem na stavení desku. Extrudér lze pohybovat ve směru os X a Y, během čehož stavební deska snižuje vrstvu po vrstvě ve směru osy Z podle virtuálního návrhu daného dílu. Roztavený materiál se takto naváže z jedné vrstvy na druhou, během toho, co jemně tuhne ve vyhřívané komoře. U FDM technologie je díl běžně tvořen zdola nahoru. Pokud díl obsahuje převislé části, tak je nutná přítomnost podpěr. U FDM tiskáren se můžeme obecně setkat s jedním až třemi extrudery, které jsou schopné tisknout až tři různé materiály nebo barvy současně. Nejčastěji se rozlišení těchto tiskáren pohybuje mezi 250 μm (XY) a 50 μm (osa Z). [12] [14]

Nejběžněji používaným materiálem je PLA (kyselina polymlečná). Nadále se můžeme setkat s vysoce odolným polystyrenem HIPS a s polymery akrylonitrilu/butadienu/styrenu tzv. ABS. Existuje však mnoho dalších materiálů, jakými jsou např. polyvinylalkohol (PVA), polyethylentereftalát (PET), polyethylentereftalát glykol (PETg), polykarbonát (PC), polyamidy (NYLON) a jejich kombinace s malým procentem skla a kovů. [12] [15]

Největší výhodou této technologie 3D tisku je velká nabídka tisknutelných materiálů. Tyto materiály jsou z hlediska nákladů levné a relativně snadno se s nimi manipuluje. To přináší i nevýhodu této technologie čímž je u většiny neúčinnost pro některé praktické aplikace v organické syntéze. Zahřívání termoplastů při vysokých teplotách může být potenciálním zdravotním rizikem. [12] [15]



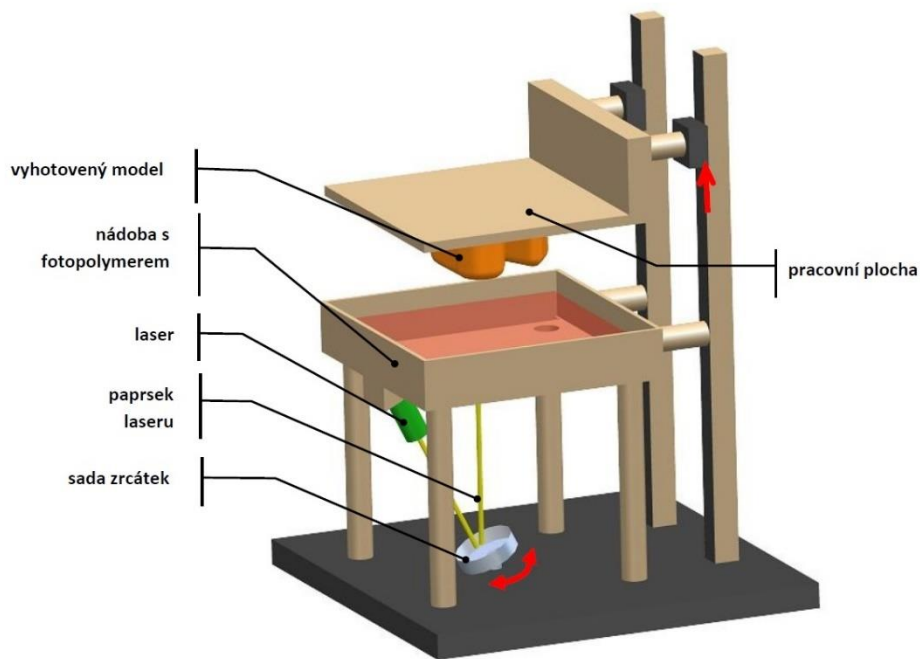
Obrázek 1 - Technologie FDM [14]

4.2. SLA

Stereolitografie je nejstarší z technologií 3D tisku. Princip spočívá v použití ultrafialového laseru (především HeCd laser nebo xenonová lampa), který je směřovaný na vanu obsahující fotopolymerní pryskyřici. Fotopolymery jsou citlivé na UV světlo a proto je-li vrstva kapalné pryskyřice vystavena UV paprsku dochází k procesu síťování a okamžitému tuhnutí a tvrdnutí. Technologie SLA také vytváří finální strukturu vrstvu po vrstvě obdobně jako u technologie FDM. Každá vrstva se staví na vrstvu předchozí a díly s velkými přesahy také vyžadují podpěry. [12] [14]

Značnou výhodou této technologie je možnost dosáhnout vysokých rozlišení v závislosti na typu pryskyřice a velikosti laseru se lze dostat běžně na vrstvu 25 μm . Výhodou také oproti FDM je vyšší stavební rychlost. Finální díl dosahuje velmi hladkých povrchů s mnoho viditelnými detaily. Proto v dnešní době našla technologie SLA uplatnění především v klenotnictví a pro dentální aplikace. Největšími nevýhodami této technologie je malá plocha tisku, a především zacházení s pryskyřicí, které je oproti filamentům FDM tiskáren více náročné na znalost i hygienu. Kromě toho je rozmanitost

pryskyřic vcelku omezená, protože všechny jsou založeny na epoxidech a akrylových derivátech. [12]



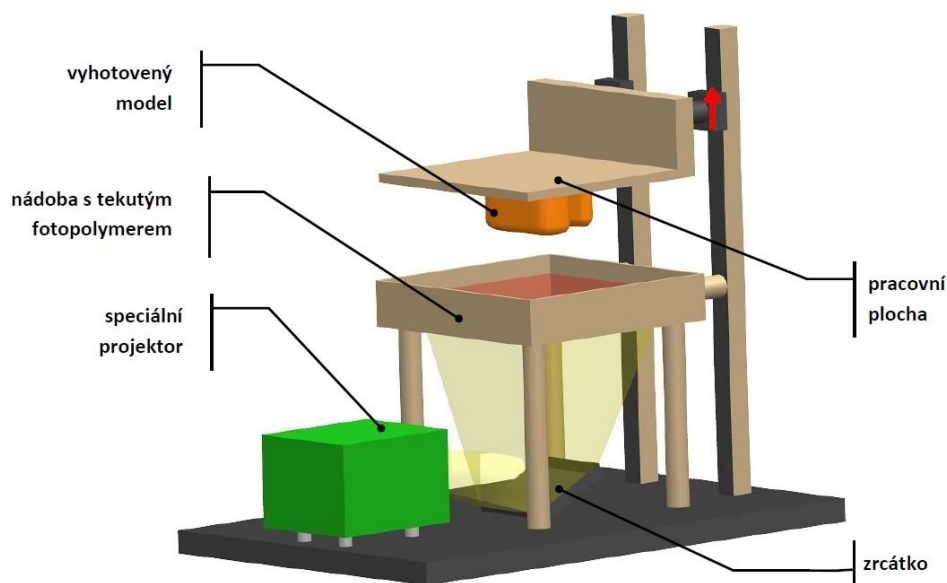
Obrázek 2 - Technologie SLA [14]

4.3. DLP

DLP neboli digitální zpracování světla bylo vynalezeno na konci 80. let 20. století a je velice podobné technologii SLA. Rozdíl mezi DLP a SLA spočívá v tom, že u technologie DLP se kapalný fotopolymer nevytváří pomocí laseru, ale pomocí speciálního projektoru. Tímto způsobem se zasítuje celá vrstva pryskyřice najednou. U této technologie je projektor umístěn těsně pod vanu, která má průhledné dno, aby byla umožněna fotopolymerizace. [12] [14]

Využívá se počítačově řízené mřížky s mikro zrcadly, která je rozložena na polovodičovém čipu. Tato zrcátka se naklání do stavů „zapnuto“ či „vypnuto“. Pokud je zrcátko ve stavu „zapnuto“ odráží světlo a vytváří jasný pixel, ve stavu „vypnuto“ je pixel tmavý. Takto vytvoří projektor na fotopolymerní vrstvě tzv. masku, která je vytvořena pouze tam, kde jsou zapnuty jasné pixely. [12]

Mezi dvě největší výhody této technologie patří, že rozměr vany neomezuje výšku tištěného dílu a že chyby polohování v rovině XY jsou značně sníženy díky omezení mechanického pohybu. Můžeme dosáhnout rozlišení ve všech osách přibližně asi 50 μm . Rozdílem oproti SLA je to, že tloušťka vrstvy není přímo závislá na použitém druhu pryskyřice, protože rozlišení u DLP tiskáren je určeno rozlišením v ose Z. Momentálně se kvůli vysokým nákladům DLP využívá nejčastěji pro profesionální a průmyslové aplikace, i když se můžeme čím dál více setkat s DLP tiskárnami přístupnými pro jednotlivé koncové uživatele. [12]



Obrázek 3 - Technologie DLP [14]

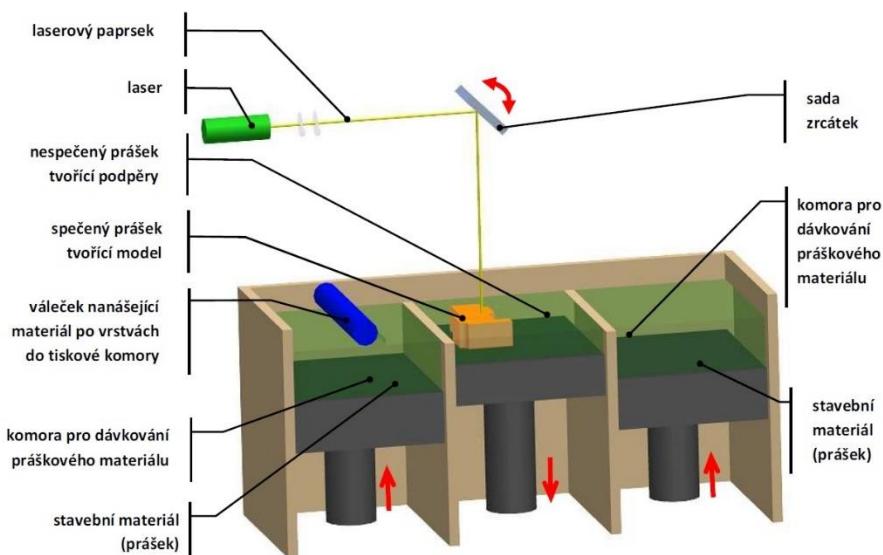
4.4. SLS a SLM

SLS se objevilo v 80. letech 20. století. Tato technologie je podobná už dříve zmiňované SLA, ale zahrnuje místo fotopolymerové pryskyřice práškový materiál. Jedná se především o polykarbonáty, polyvinylchlorid, polyamidy, ABS a keramiku. Princip spočívá v selektivní tavení vrstvy malých granulí, které se pojí a vytváří pevnou strukturu vrstvu po vrstvě. K tavení se používá vysoce výkonný, často drahý laser (například CO_2). Podle virtuálního designu dílu laser podél průřezu ohřívá malou vrstvu prášku na teplotu těsně pod bod tání. Pokaždé co se nataví každý průřezu se práškové lože sníží o jednu vrstvu

a na novou horní vrstvu se uloží nové práškové granule připravené pro další tavení, dokud není tisk dokončen. [12]

Výhodou SLS oproti SLA a FDM je absence podpor, protože samotný prášek, který se neroztaví slouží jako nosná struktura. Výsledný tištěný díl zároveň nemá žádné vnitřní vady, což je velmi důležité pro kovové součásti, které pracují pod vysokým napětím např. v automobilové a leteckém průmyslu. Rozlišení, se u těchto tiskáren obecně pohybuje pod 50 μm . Značnou nevýhodou je, že většina komerčních kovových 3D tiskáren stojí více než půl milionu dolarů, což znamená že pro jednotlivé koncové uživatele je používání nemožné. [12] [14]

Technologii SLM lze považovat za podskupinu technologie SLS. SLM totiž využívá také vysoce výkonný laser, ale k úplnému roztavení prášků a různých slitin. Jedná se např. o hliník, stříbro, železo, titan, kobalt, chrom a nerezovou ocel. Aby se prášek v tomto případě mohl spojit, SLM tento laser využívá k zahřátí prášku nad bod tání kovu. [12]



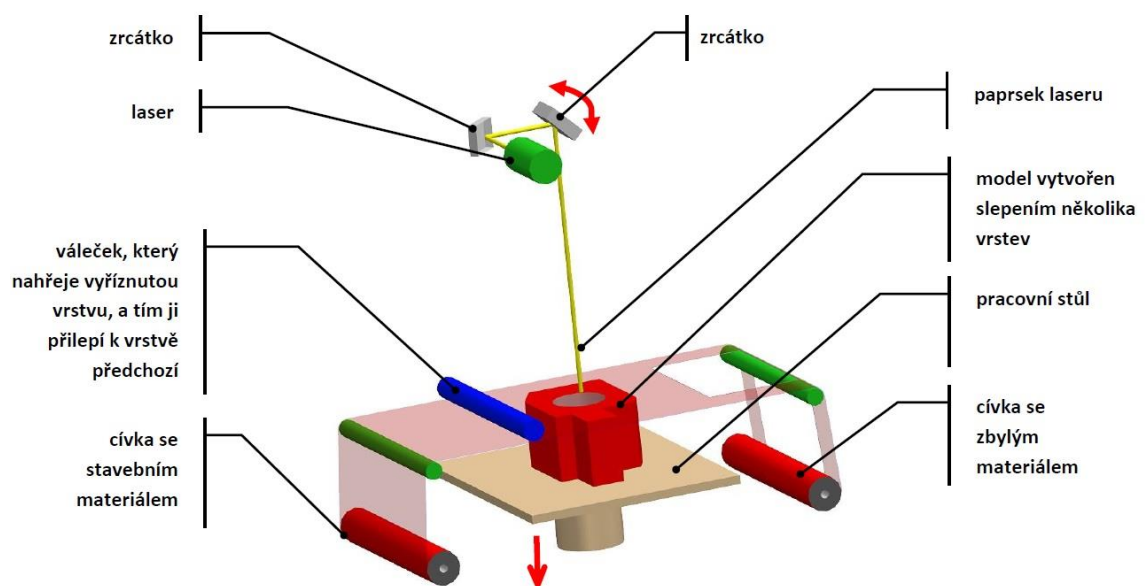
Obrázek 4 - Technologie SLS [14]

4.5. LOM

Technologie LOM byla vyvinuta kalifornskou společností Helisys Inc. na konci 90. let 20. století a funguje na principu lepení papírů, plastů nebo kovových

laminátů. Tyto materiály jsou na sebe lepeny teplem nebo tlakem. Operaci řídí počítačem vedený laser, který dle virtuálního návrhu sleduje daný průřez na první vrstvě materiálu. Následně se daný materiál odstraní a stejným způsobem se na první vrstvu umístí vrstva druhá. Nejčastěji je druhá vrstva nalepována či přivařována na horní část vrstvy první. Aby docházel k rovnoměrnému nanášení, kontroluje se tento proces ohřevem během výroby. Takto se dokola proces opakuje, dokud se nevytiskne požadovaný díl. [12] [14]

Mezi hlavní nevýhody této technologie patří postprocessing, tedy většina dílů se po tisku musí následně obrobit či vrtat. Dalším mínusem je fakt, že aby technologie LOM mohla být správně formována, je zapotřebí materiály připravit do malých listů vůli integraci s lepidly. I když LOM nedosahuje přesnosti technologií SLA a SLS, největší výhodou je, že se stále jedná o nejrychlejší prototypový systém pro vytváření poměrně velkých dílů. Ve výsledku tato technologie je poměrně jednoduchá, přesto jsou 3D LOM tiskárny drahé. [12]



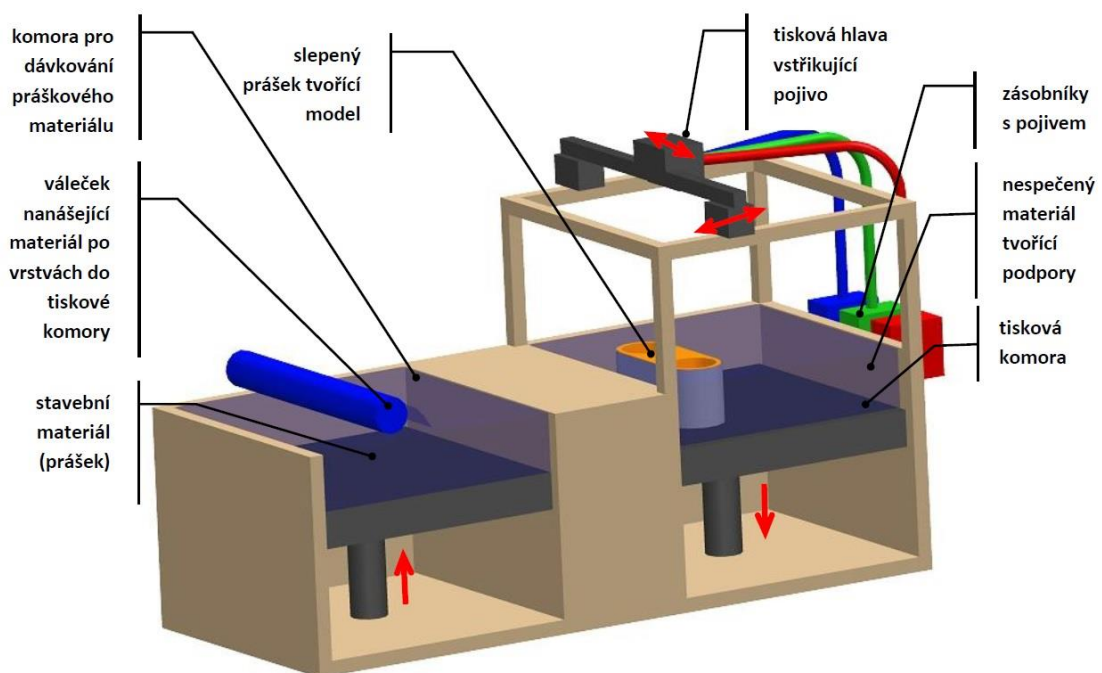
Obrázek 5 - Technologie LOM [14]

4.6. BJ

BJ neboli tzv. „práškový tisk“ či „inkoustový 3D tisk“ je aditivní výrobní proces, který pracuje na principu tryskání pojiva dvou materiálů v různých podobách. V podobě prášku a vodní báze. U této technologie je nejdřív vrstva prášku distribuována na konstrukční platformu a následně pomocí inkoustové tiskové hlavy nanese kapalně pojivo. Kapalně pojivo působí mezi vrstvami prášku jako lepidlo. Poté co se nanese pojivo je na povrch přidána další vrstva prášku. Tento proces se opakuje, dokud se nevytisknou celý díl. [12] [14]

Výhodou je, že v případě této technologie není potřeba pro převislé části stavět podpory, protože samotná nenalepená vrstva prášku může fungovat jako konstrukční prvek. BJ dokáže pracovat téměř s jakýmkoliv dostupným materiálem, pokud je dispozici v podobě prášku. Do pojiva lze přidat značné množství přísad. Finální strukturální integrita konečného dílu není příliš robustní a lze dosáhnout velkých přesností. [12] [14]

Počítač, který dávkuje prášek bývá nahrazován např. fotonulou. V tomto případě jsou tyto technologie známy jako MJM (multijetové modelování) nebo PJ tryskání fotonulou. [12]



Obrázek 6 - Technologie BJ [14]

4.7. EMB a ostatní technologie 3D tisku

Technologie EMB využívá k roztavování kovových prášků z titanu, mědi, nerezové oceli či niobu výkonný elektronový paprsek při vysokých teplotách mezi 700 a až 1000 ° C. V případě této technologie se obvykle zahřívá Wolframové vlákno uvolňující elektrony, které jsou následně urychlovány a směřovány pomocí dvou elektromagnetů na povrch prášku. To vytváří ohřívací účinek pro práškové částice, které se taví společně vrstvu po vrstvě a vytvářejí tím plné kovové díly. Zbytek prášku se na konci odstraňuje výplachy či kartáčováním. Výhodou této metody je, že kovové díly si zachovávají své materiálové vlastnosti. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost. [12] [14]

Mezi další známé technologie 3D tisku patří například: DIW, který je užitečný z hlediska přístupu k biomateriálům nebo DLW, při kterém je pevná vrstva fotorezistu vystavena laseru, který lze řídit třemi směry. V tomto případě se objekt nevytváří přístupem po vrstvách, ale subtraktivním způsobem. [12]

5. Technické normy popisující metody přesnosti 3D tisku

Mezi normy zabývající se 3D tiskem a aditivní výrobou patří ISO/TC 261 a její podskupiny. Rozsah této normy se zabývá standardizací v oblasti aditivní výroby v oblasti procesů, termínů, definic, zkušebních postupů, parametrů kvality atd. Detailní přístup jsem dostal k pouze normě ISO/ASTM 52902:2019, u ostatních norem se jedná pouze o ukázkou související s vývojem artefaktu a zkoušením. [18]

5.1. ISO/ASTM 52902:2019 – Testovací artefakty

Norma ISO/ASTM 52902:2019 se zabývá posuzováním geometrických schopností systému aditivní výroby, a to ohledně testovacích artefaktů. Testovací artefakty se primárně používají ke kvantitativnímu posouzení geometrických vlastností a chyb 3D tiskáren. [19]

Tato norma popisuje řady testovacích geometrií, které jsou pro zkoumání jedné či více konkrétních metrik výkonu. Také obsahuje příklady konfigurací těchto geometrií do testovacích artefaktů. Přesto, že tato norma předepisuje veličiny a udává kvality testovaných geometrií, tak přímo nediktuje konkrétní metody měření. Je to z důvodu, že různé aplikace mohou vyžadovat různé stupně kvality a výkonu. Lze zde nalézt i požadavky na nejistoty měření a konfigurace funkcí. [19] [17]

Tento dokument ale nepojednává o konkrétním postupu nebo nastavení stroje pro výrobu testovacího artefaktu. [19] [17]

Mezi obecné zásady pro vytváření artefaktů popsanych v normě patří:

- Použití kvalitního výchozího materiálu – Aby byla zajištěna kvalita opakovatelných výsledků, musí být použit předem specifikovaný materiál. Koncový uživatel by měl vybrat a určit materiál a suroviny pro testovací artefakt dle specifikace. Mezi specifikační způsob např. spadá vlastnost částic (velikost, morfologie, atd.), sypné vlastnosti či

chemické vlastnosti při použití práškového materiálu. Pokud se obě strany nedohodnou jinak, materiálové specifikace nebývají zveřejňovány, pouze jsou zdokumentovány. [20]

- Nutnost vytvoření artefaktu podle zdokumentované specifikace – Zpracování a návrh artefaktu pro aditivní technologie by mělo být provedeno dle zdokumentované specifikace procesu. Většinou se jedná o interní či externí standard, ale i přesto by měla být zpřístupněna nastavení a podmínky stavby dílu. Například by měla být určena tloušťka vrstvy, teplota, parametry tisku atd. Tyto procesy by měly být konzistentní pro všechny tištěné artefakty vytvořené v rámci jednoho měření. [20]
- Množství testovacích artefaktů – Kompletní test výkonu stroje určují dvě věci. Nejprve musí specifikace testu zajistit množství artefaktů, aby bylo možné provádět statisticky použitelná měření. Druhou věcí je dostatečné pokrytí stavěcí platformy. Menší množství testovacích artefaktů se používá pro namátkové kontroly či porovnání více strojů mezi sebou. [20]
- Zohlednění orientace tisku – Vzhledem k tomu, že testovací artefakty slouží k odhalení slabých a silných stránek dané technologie a tiskárny, často dochází k selhání některých částí artefaktu. Často je třeba zvážit jaké prvky artefaktu selžou a podle toho je umístit dle polohy, buď pro zkušební účely nebo pro minimalizaci rizika. [20]
- Pokrytí – Abychom získali reprezentativní data pro výrobu skutečných dílů, je důležité, aby se artefakty tiskli s dostatečným pokrytím podložky. Pokrytí vyhodnocuje variabilitu v celém objemu dílu. Jedná se o osvědčený postup tisku, vyvarujeme se tím chybám, které jsou pouze třeba v některé části stavěcí platformy. [20]
- Konsolidace dílů – Nejpraktičtější je sestavení artefaktu z více prvků, tedy jednu kombinovanou část namísto více malých. Protože 3D tisk je vrstvený proces, často založený na pixelech, může přesná poloha součástí a prvků značně ovlivnit tisk a test. [20]

- Podpory a post processing – Pokud je to možné, je dobré si při tisku testovacích artefaktů vyhnout podpěrám nebo použít podpěry tam, kde nepřekáží daným prvkům artefaktu. Ve specifikaci procesu musí být plně zdokumentována strategie podpor, mimo jiné včetně materiálu, geometrie a techniky odstranění. [20]

V normě ISO/ASTM 52902:2019 ještě můžeme najít krátký přehled o tom, jak měřit testovací artefakty. Testovací artefakt by měl před měření být ponechán, aby vychladl a dostal se na pokojovou teplotu a poté měřen bez jakéhokoliv následného zpracování. Pokud jsou díly vyrobeny procesem založeným na práškovém loži, měly by být díly před měřením zcela odděleny od okolního prášku. Je známo, že strategie měření dokáže ovlivnit celkovou nejistotu (jak rozměrovou, tak povrchovou). U měření drsnosti např. strategie měření zahrnuje použité filtry jako je mezní délka. Někdy mohou být nominální hodnoty příliš nerovnoměrné nebo drsné, a proto je k získání průměrného výsledku někdy nutné změřit více bodu. Mezi nejpoužívanější nedestruktivní měření se používá CT. Obecně neexistuje nejlepší postup pro provádění konkrétních měření artefaktů. [20]

5.2. ISO 27547-1:2010 – Plasty a příprava zkušebních vzorků termoplastických materiálů

ISO 27547-1: 2010 specifikuje obecné principy přípravy zkušebních vzorků pomocí technologií bez forem, také označovány jako metody „bez nástrojů“. Všechny tyto technologie vytváří objekty vrstvu po vrstvě. Tvar a rozměry dílů jsou specifikovány pomocí numerického popisu v CAD. Tento virtuální model je „rozřezán“ na vrstvy pomocí vhodného softwaru (sliceru). Použitými softwarovými systémy mohou být nezávislé programy, které se strojem propojují samostatně, nebo mohou být integrovány do uvnitř stroje. [17] [21]

Tato část ISO 27547 také specifikuje obecné zásady, které je třeba dodržovat při přípravě zkušebních termoplastických vzorků. Tato norma také poskytuje základ pro stanovení reprodukovatelných podmínek. Jejím cílem je podpořit jednotnost při popisu hlavních parametrů hlavně u technologie SLS. [17] [21]

5.3. ISO 17296-3:2014 – Obecné zásady aditivní výroby a hlavní charakteristiky a odpovídající zkušební metody

Norma ISO 17296-3: 2014 zahrnuje hlavní požadavky na testování dílů vyrobených aditivními technologiemi. Specifikuje hlavní kvalitativní charakteristiky dílů, vhodné zkušební postupy a doporučuje rozsah a obsah dohod o zkouškách a dodávkách. [17] [22]

Norm se také zaměřuje na výrobce strojů, dodavatele, uživatele strojů, dodavatele dílů a zákazníky. A zajišťuje usnadnění komunikace o hlavních charakteristikách kvality. Používá se a platí všude tam, kde se komerčně zachází s procesy aditivní výroby. [17] [22]

5.4. ISO/ASTM 52900:2015 – Obecné zásady terminologie aditivní výroby

Norma ISO/ASTM 52900: 2015 zavádí a definuje pojmy používané v technologii aditivní výroby a veškerých technologiích, které vytvářejí objekty postupným skládáním vrstev. Termíny zmíněné v této normě jsou zařazeny do konkrétních oblastí a konkrétních použití 3D tisku. Momentálně je ve vývoji dodatek s novými termíny v rámci ISO/TC 261, který bude zahrnut do připravovaných změn a přehledů této mezinárodní normy. [17] [23]

6. Zkušební artefakty využívané dle technologií 3D tisku

6.1. Zkušební artefakt

Zkušební artefakt se standardizuje pro účely vyhodnocení výkonnosti systémů aditivní výroby (AM). Z dříve používaných a ozkoušených artefaktů byl v současné době inspirován a na základě zkušeností navržen testovací design nového artefaktu. Tento nový artefakt je navržen tak, aby ukazoval a poskytoval charakteristiku schopností a vlastností s omezením na různé systémy AM a aby také umožňoval lepší vyhodnocení a zlepšení systému propojováním konkrétních chyb měření. Navržený testovací artefakt je zakomponován do více materiálů a více technologií AM. Jako výsledek bereme data z několika možností sestavení artefaktu a měření využíváme pro vylepšení konkrétního systému AM. [1]

Většina chyb v systému se kombinuje a přispívá k chybám v součásti, pokud vyrobíme zkušební artefakt umožňujeme tím vyhodnocení složeného testu, který zahrnuje obě tato pole působnosti. Nevýhoda složených testů často bývá v jejich obtížnosti. Obtížnost propojení a vyhodnocení chyb součástí a chyb systému závisí na konkrétním případě. Výhodou těchto zkušebních artefaktů je pak zejména možnost sladit výrobu dílů s přímým a skutečným účelem systému AM. Vybavení pro tuto skutečnost je běžné pro výrobu samostatných dílů, a proto v tomto případě není nutné používat specializované měřicí zařízení. [1]

Hlavním účelem zkušebního artefaktu je kvantitativně vyhodnocovat výkon systému. Očividnou výhodou a důvodem vytvoření standardizovaného artefaktu je, že lze snadno porovnávat různé systémy AM mezi sebou. Zkušební artefakt by měl být správně navržen tak, aby zároveň testoval hranice a omezení daného systému AM. Standardizovaný testovací artefakt může sloužit jako výzkumný prostředek pro zlepšování vlastností AM, jako ověřovací metoda výkonu pro uživatele a prodejce či jako demonstrace pro různé platformy dodavatelů systémů AM. [1]

V roce 2014 Národní institut norem a technologií (NIST) v USA vypracoval obsáhlou publikaci o „pravidlech“ pro zkušební artefakty. Níže uvedená pravidla pocházejí z existující literatury a zkušeností návrhu artefaktů v různých systémech AM. [1]

6.2. Pravidla pro zkušební artefakty

S postupným vývojem a poptávkou po aditivní výrobě se pomalu začala vytvářet pravidla po správné vyhodnocení vlastností systému AM. Na začátku vývoje stereolitografie (SLA) přišli Richter a Jacobs [2] s potřebou vytvoření ideální součásti pro měření přesnosti. Důvodem bylo vytvoření možnosti kvantitativně zaznamenávat výsledky vlastností systémů AM a materiálů v nich používaných. [1]

Cituji, standardní zkušební artefakt by měl:

- Být dostatečně velký, aby otestoval výkonnost systému poblíž okrajů platformy a blízko středu
- Mít značný počet malých, střední a velkých prvků
- Mít otvory a vyčnívající prvky
- Netrvat příliš dlouho být vyhotoven
- Nespotřebovat velké množství materiálu
- Být snadno měřitelný
- Mít mnoho vlastností „skutečné“ součásti (tenké stěny, rovné povrchy, díry atd.)

Postupem času další vědci tato kritéria obohatili o další pravidla. Byun [3] odkazoval na tato pravidla, ale dodal, že: „Testovací část by měla zahrnovat prvky podél všech os a měla by zahrnovat i prvky používané k určení dosažitelné minimální velikosti prvku.“ [3]

Mnoho těchto kritérií je důležitým hlediskem návrhu zkušebního artefaktu, ale ideální artefakt by nejen měl odhalit chyby a omezení systému, také by tyto chyby a omezení měly vzájemně souviset s konkrétními vlastnostmi systému. Zkušební artefakt by měl nejen vyhodnocovat omezení systému, ale tak by měl být schopen funkcí optimalizace parametrů zpracování.

Scaravetti [4] uvedl myšlenku, že „kvalifikační postup musí umožňovat identifikaci a kvantifikaci defektů, ale také určení zdroje defektů“. [1] [4]

K tomu by měl testovací artefakt:

- Mít jednoduché geometrické tvary (snadné ovládní geometrie, dokonalá definice)
- Nevyužívat žádný manuální zásah (např. žádné podpory) a žádný post-treatment
- Umožňovat opakovatelnost měření

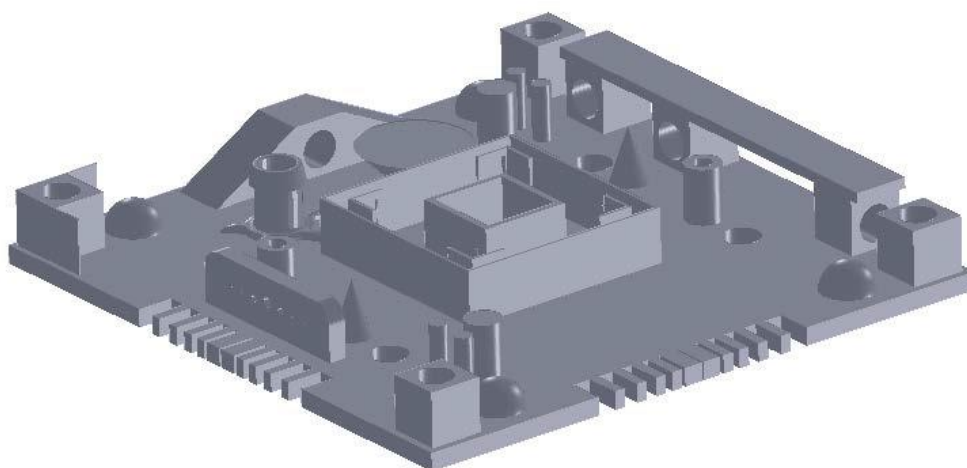
Několik dalších výzkumníků naznačuje a uvádí potřebu zkušebního artefaktu obsahovat násobky stejných funkcí pro možnost opakovatelnosti měření. To ale znamená, že se pouze testuje schopnost systému AM produkovat podobnou funkci, nikoli testování opakovatelnosti systému. Rozdílné podmínky vedou k rozdílným systematickým chybám na různých místech sestavení, to vede k rozdílům ve tvarech prvků v těchto pozicích. Pokud by vytvořil systém s dokonalou opakovatelností více zkušebních artefaktů, které by byly přesně stejné, přesto může nadále dojít ke zkreslení. Existuje řada zkušebních artefaktů AM dle literatury, ale ne všechny dodržují výše diskutovaná kritéria a žádný neprošel formálním standardizačním postupem, krom výjimky v metrologii obráběcích strojů. [1] [4]

6.3. Zkušební artefakty pro jednotlivé aplikace

Z dříve načerpaných dat dostupné literatury a vědeckých publikací byly vytvořeny některé osvědčené zkušební artefakty pro konkrétní aplikace systémů AM. Zkušební artefakty můžeme rozdělit dle několika účelů např. pro porovnání systémů AM a použitých technologií, pro vyhodnocování konkrétních systémů, pro hodnocení technologií kovových součástí a další. V podkapitole rozebereme pouze první dvě zmíněné z důvodu rozsáhlosti problematiky. [1]

6.4. Zkušební artefakty pro porovnání systémů AM a použitých technologií.

Bylo navrženo mnoho porovnávacích součástí pro kvantitativní srovnání vlastností systémů AM a technologií v nich využívaných. Dříve platilo, že si uživatelé museli vybrat technologii, která nejlépe zapadá do konceptu pro jejich aplikaci. K rozhodnutí pomáhaly srovnávací studie s dříve vypracovanými referenčními součástmi. S postupným vývojem se specifické technologie AM více vyrovnaly a vědci přidali do referenčních součástí více artefaktů. Nakonec dokázaly systémy AM přijmout podporu více platforem strojů a výrobců, z čeho následovalo hromadné srovnání kategorií procesů a vytvoření více objektivních součástí. Tyto součásti standardizovalo a začalo využívat vícero výrobců. [1] [4]

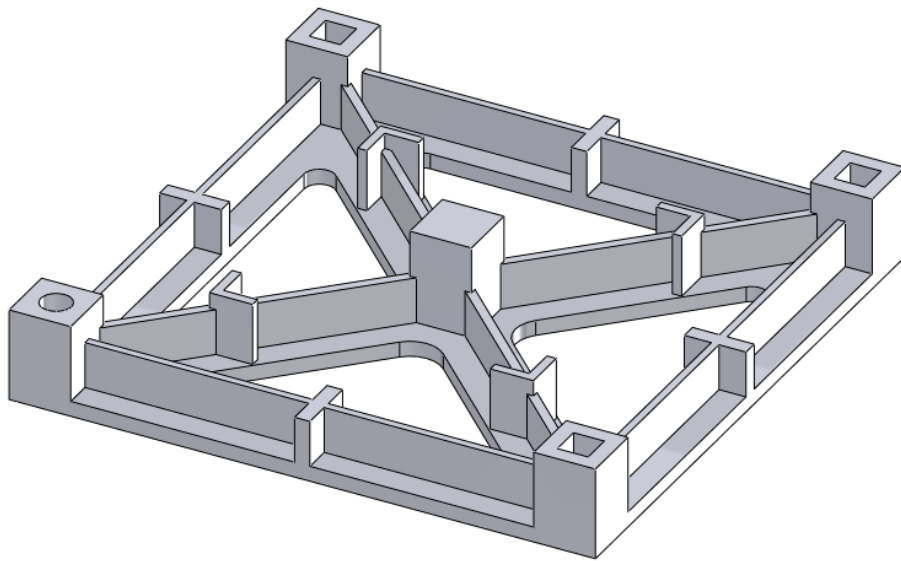


*Obrázek 7 -Zkušební artefakt používaný firmou Maheshem (rampy, kužely, polokoule, převislé prvky)
[1]*

6.5. Zkušební artefakty pro vyhodnocování konkrétních systémů

Dalším důležitým aspektem využívání zkušebních artefaktů je hodnocení konkrétních systémů AM. Důvodem často bývá nový materiál či proces nebo jde pouze o zlepšení a optimalizaci stávajícího systému. Jedním z prvních zkušebních kusů k určení kvantitativních vlastností je tzv. „uživatelská součást“. Tento artefakt byl poprvé navržen v roce 1990 pro technologii SLA k určení přesnosti strojů v rovině xy. Nepatrné variace této součásti jsou

používány v mnoha studiích pro konkrétní technologie a materiály. Při uvedení nové technologie či materiálu, používáme tento model pro kvantitativní měření součástí. V dnešní době se spíše vývoj artefaktů zaměřuje na technologii a systém samotný, nikoli na nový materiál součástí. Napříč dostupné literatuře a dříve vyhotovených artefaktů, většina výrobců vlastní obvykle veřejně nedostupné interní testovací kusy obdobné „uživatelské součásti“ s lehkou modifikací pro své pole působnosti. [1] [3]



Obrázek 8 - Model „uživatelské součásti“ pro vyhodnocení přesnost v rovině xy [1]

7. Návrh a vývoj zkušebního artefaktu

Návrh artefaktu byl inspirován novými artefakty pro testování technologií FDM a DLP. Z každého artefaktu byly vybrány prvky pro zkoušený díl tak, aby byly relevantní pro obě použité technologie. Byly zohledněny dříve zmíněné normy a artefakt navržen podle standardů. Vývoj a tisk artefaktu proběhl ve třech verzích.

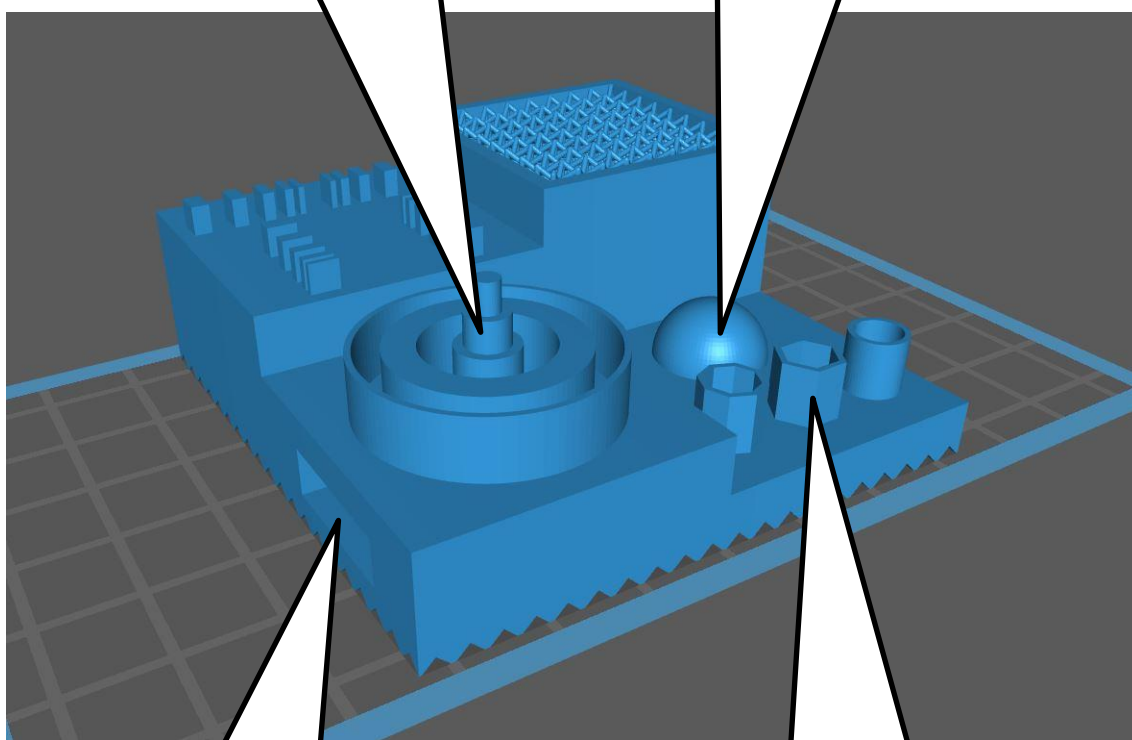
7.1. Návrh artefaktu

Kruhová část

Prvek se skládá ze tří prstenců na ploché základně. Slouží k ověření možnosti tisku malých a větších průměrů. Pozorujeme geometrické a rozměrové přesnosti tisku.

Polokoule

Prvek sloužící pro vizuální kontrolu kvality tisku, především u malých dílů. Polokoule musí být symetrická, mít správný tvar a co nejvíce hladký povrch.



Obrázek 9 - Artefakt (pohled z přední strany)

Vlna

Tento prvek slouží k dosažení kvalitní zvlněné plochy bez viditelných kroků. Jedná se o zkoušku kalibrace, intenzity expozice a u DLP charakterizuje kvalitu pixelů.

Válce

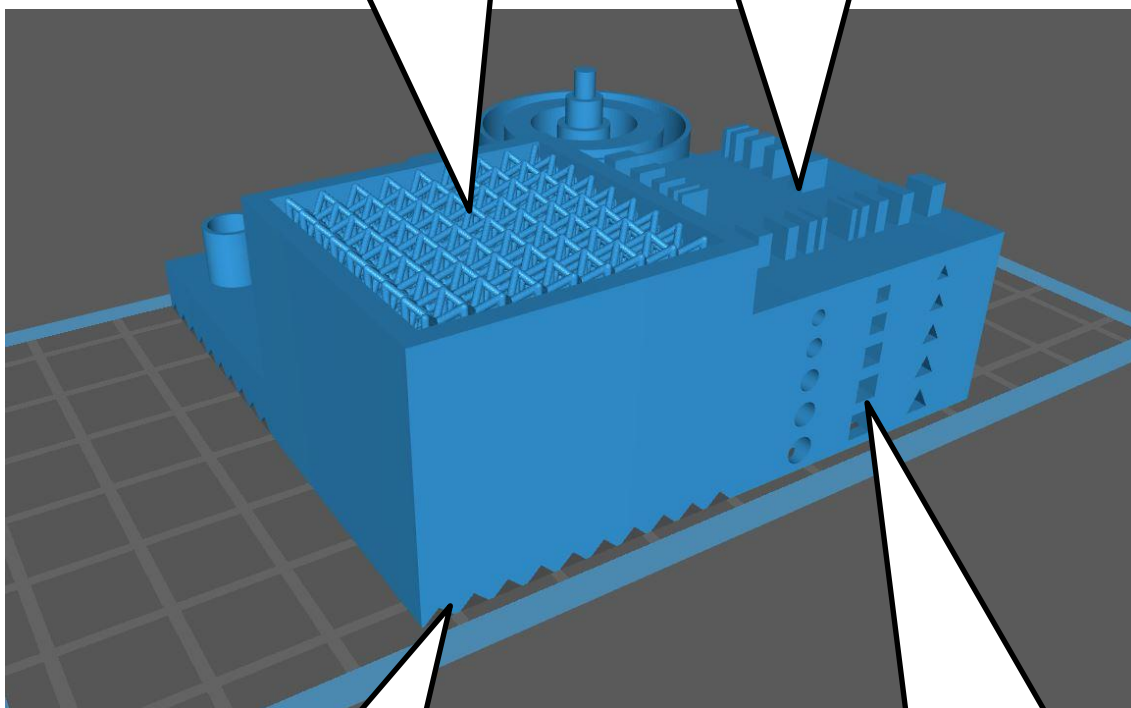
Prvky jsou pro vyhodnocení odchylky od nominálního modelu a porovnání deformací mezi čistým válcem, šestihranem a osmihranem.

Lattice structure

Prvkem je mřížková struktura, která vyplňuje „prázdný“ prostor. Používá se pro snížení hmotnosti dílu, energie výroby a snížení výrobního času. Na tomto artefaktu slouží jako tzv. test reálnosti. Jaké jsou možnosti a rozsah tisku (rozlišení v XY).

Sloty

Prvek potřebný k určení schopnosti orientace tisku dílu. Kontrola lineární přesnosti. Cílem je zajistit, aby sloty nebyly bez viditelných trhlin a měli mezi sebou zachovanou vzdálenost.



Obrázek 10 - Artefakt (pohled ze zadní strany)

Jehlany v podstavě

Jehlany slouží jako zkoušení přilnavosti a realizovatelnosti tisku. Artefakt byl navržen ve 3. verzích a jehlany postupně ořezávány.

Otvory

Tento prvek odhaluje větší množství chyb při 3D tisku (především u DLP). Pokud jsou otvory příliš velké, je doba expozice krátká. Pokud příliš malé, doba expozice je příliš dlouhá. Občas dochází ke špatné přilnavosti spojené s nesprávným nastavením tisku. Větší otvory v dolní části by měly být průchozí.

7.2. Vývoj artefaktu

Během vývoje artefaktu se vyskytly problémy ohledně tisku prvních dvou verzí artefaktů. Vzhledem k tomu, aby zkušební artefakt splňoval své účely, tak všechny verze artefaktu byly tištěny bez podpor. Jednotlivé jehlany proto sloužily jako jediná základna pro tisk. U první verze se stavební jehlany dotýkaly pouze okrajově a dotyk se stavěcí podložkou byl minimální. Druhá verze byla navržena jako hraniční možnost pro dané technologie. Třetí verze byla zhotovena pro následné měření a vyhotovení výsledků. U všech verzí zůstaly prvky artefaktu stejné, měnili se pouze jehlany na podstavě.




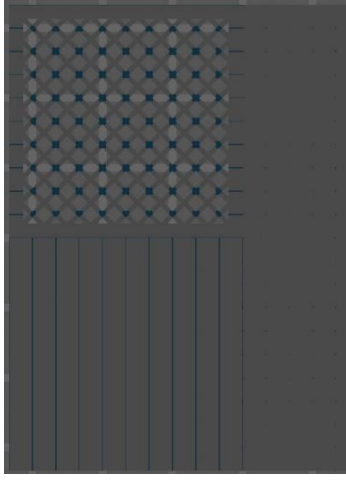
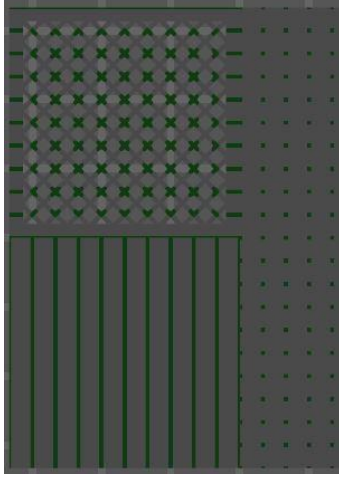
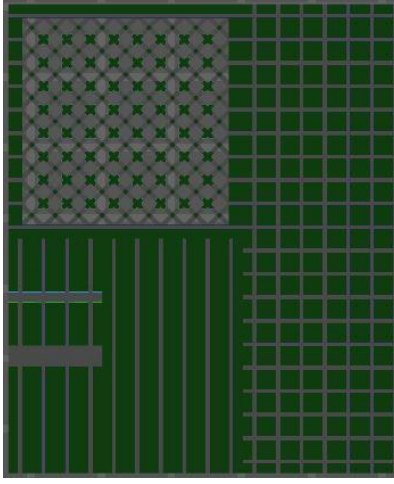
Verze 1 byla základní a byla oříznuta o 0,4 mm, a to pouze kvůli přečnávající lattice structure. Jehlany u této verze byly celé. Proto základní dotyk s podložkou, a tedy nula pro tiskárnu je posunuta o 0,4 mm.

Verze 2 byla oříznuta o 0,4 mm (pro nulu) + 0,5 mm (jehlany). Tedy výsledný posun artefaktu na podložce byl o 0,9 mm.

Verze 3 byla dle doporučených nastavení a komunikace posunuta o celý 1,5 mm. Tedy 0,4 mm pro nulu a 1,1 mm pro jehlany.

Následující hodnoty a výstupy ze sliceru lze najít v tabulce 1.

Tabulka 1 – Tři verze zkušebního artefaktu

Verze 1 (0,4 mm)	Verze 2 (0,4 + 0,5 mm)	Verze 3 (0,4 + 0,9 mm)
		
		


8. Realizace tisku na vybraných FDM a DLP tiskárnách

Tisk artefaktu byl realizován na čtyřech tiskárnách, s nichž byly měřeny a zaznamenány výsledky pouze ze tří. Pro technologii FDM to byly tiskárny Original Prusa MINI+ a ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+. Pro DLP technologii byl artefakt tisknut na tiskárně Anycubic Photon S a pouze zkušebně na ORIGINAL PRUSA SL1S SPEED pro Prusa Research.

8.1. Original Prusa MINI+

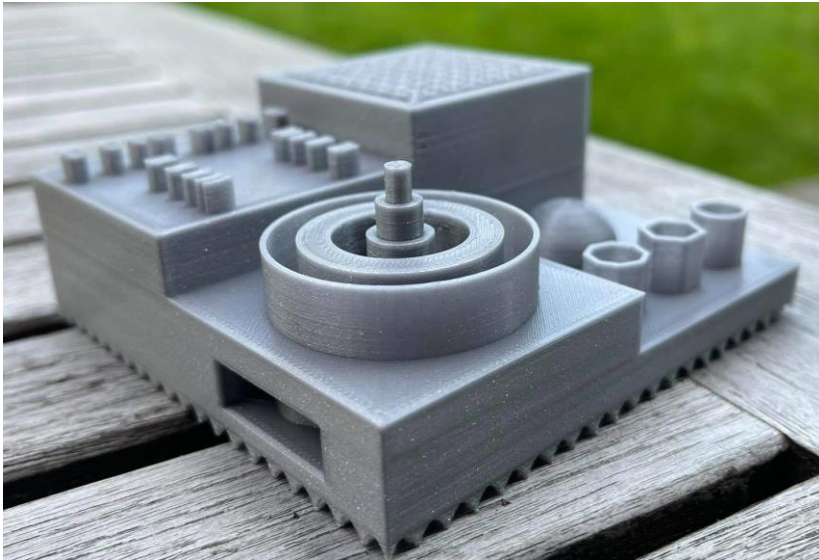
První zvolenou tiskárnou pro tisk artefaktu je Original Prusa MINI+. Jedná se o menší, levnější a kompatibilnější provedení tiskárny ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+. Tisk artefaktu proběhl ve třech verzích za stejných nastavení.

Tabulka 2 - Parametry pro tisk Original Prusa MINI+

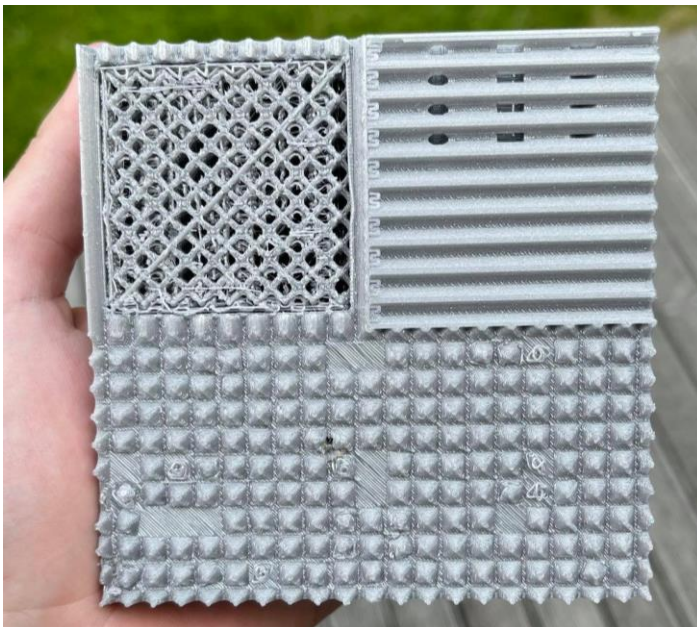
Pracovní prostor (mm)	180x180x180	
Výška vrstvy (mm)	0,20 (Quality)	
Průměr trysky (mm)	0,4	
Velikost dílu (mm)	V1: 100x100x40,6 V2: 100x100x40,1 V3: 100x100x39,5	
Teplota trysky/podložky	215 °C / 60 °C	
Materiál	Prusament PLA	
Výplň	15 %	
Doba tisku (liší se v rámci minut kvůli tisku tří verzí)	Cca 16h 30m	

Obrázek 11 - Tiskárna Original Prusa MINI+ [24]

Tisk artefaktu verze 1 pro tiskárnu Original Prusa MINI+ vyšel velmi dobře. Překvapením bylo, že MINI+ jako jediná zkoušená tiskárna dokázala vytisknout verzi artefaktu 1. Jedním z faktorů mohlo být, že tisk na této tiskárně proběhl přímo v laboratořích Prusa Research za skvělých teplotních podmínek a na nové podložce. Na obrázcích 12 a 13 lze vidět artefakt z bočního pohledu a zespodu, kde můžeme vidět stavební jehlany.



Obrázek 12 - Artefakt verze 1 od MINI+ (pohled z přední strany)

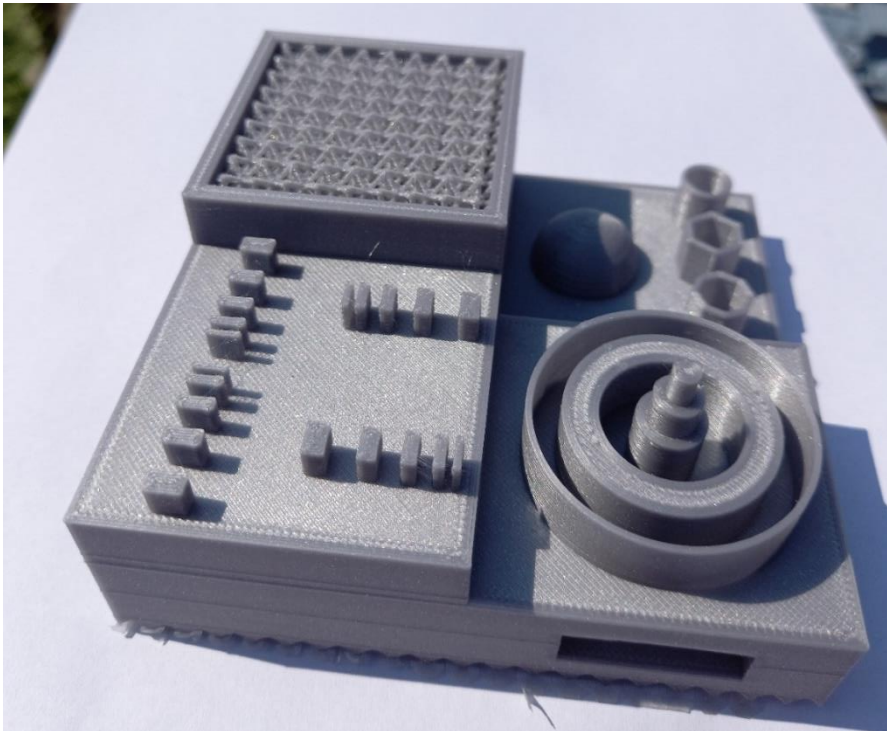


Obrázek 13 - Artefakt verze 1 pro MINI+ (pohled na stavební jehlany)

Verze artefaktu 2 pro MINI+ byla také vytištěna, ale pro účely vyhodnocení nebyla příliš zajímavá a nebyla s čím porovnávat, proto jsem ji do měření a

výsledků nezahrnul. Nicméně to nemění fakt, že jako jediná tiskárna dokázala MINI+ s novou podložkou vytisknout všechny verze navrženého artefaktu.

Pro měření a vyhodnocení výsledků a porovnání tiskáren mezi sebou jsem použil verzi 3. Na obrázku můžeme vidět výtisk artefaktu verze 3 z tiskárny MINI+.




Obrázek 14 - Artefakt verze 3 od MINI+ (pohled shora)

8.2. Original Prusa I3 MK3S+

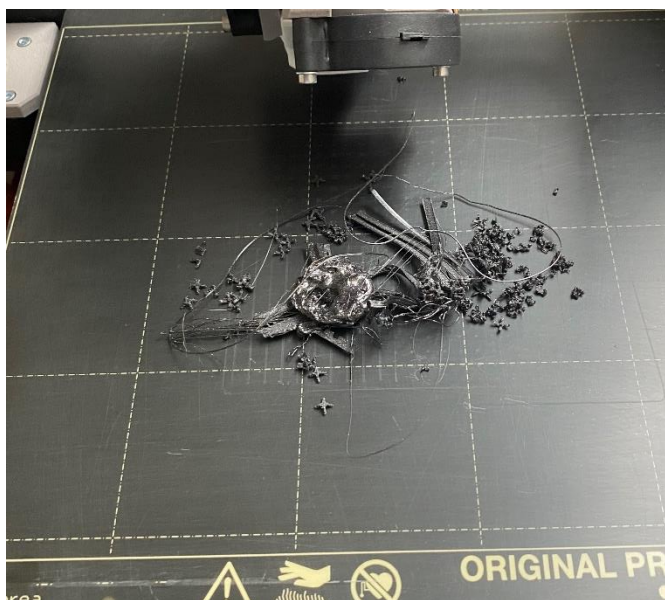
Artefakt byl ve třech verzích tisknut také na tiskárně ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+, pracující také na principu technologie FDM (FFF).

Tabulka 3 - Parametry tisku pro ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+

Pracovní prostor (mm)	250x210x200	
Výška vrstvy (mm)	0,20 (Quality)	
Průměr trysky (mm)	0,4	

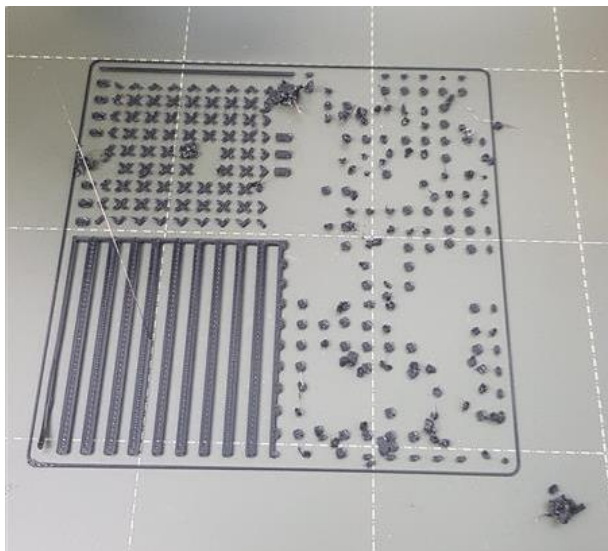
Velikost dílu (mm)	V1: 100x100x40,6 V2: 100x100x40,1 V3: 100x100x39,5	 <p>Obrázek 15 - Tiskárna ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+ [24]</p>
Teplota trysky/podložky	215 °C / 60 °C	
Materiál	Prusament PLA a PETg	
Výplň	15 %	
Doba tisku (liší se v rámci minut kvůli tisku tří verzí)	Cca 18h 4m	

Jak bylo předpokládáno, tisk artefaktu verze 1 nebyl dokončen. To bylo způsobeno dvěma faktory, tím více závažným bylo odtržení artefaktu od základu kvůli konstrukci v oblasti jehlanů na podstavě. Tyto jehlany pouze s takto málo opěrnými body nedokázaly model udržet na stavěcí desce. Druhým faktorem mohla být příliš velká teplota v místnosti. Na obrázku 16 můžeme vidět, že artefakt verze 1 se utřhl a z deformoval.



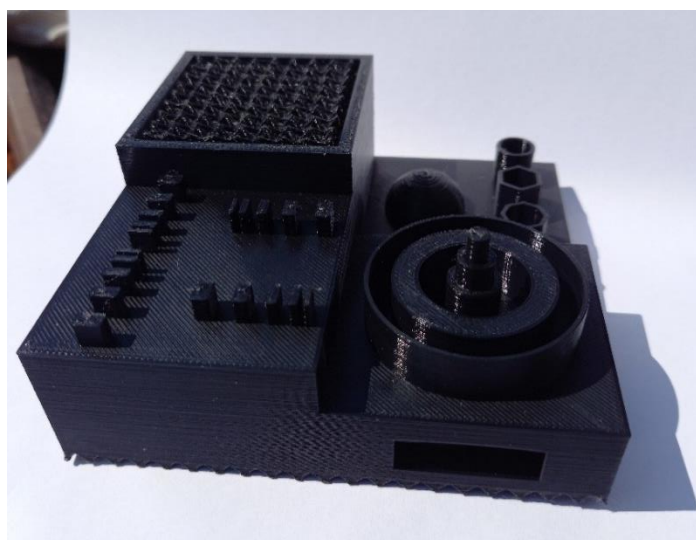
Obrázek 16 - Nepovedený výtisk artefaktu verze 1 od MK3S+

Se stejným nastavením byl tisknut i artefakt verze 2, s nímž už byla možnost sledovat uchycení na podložce. Bohužel váha zbytku modelu, modelem následně při více výtiscích posunula, tak tisk také nebyl dokončen. Na obrázku 17 lze vidět částečný postup u uchycení na podložku, bohužel stále neúspěšný.

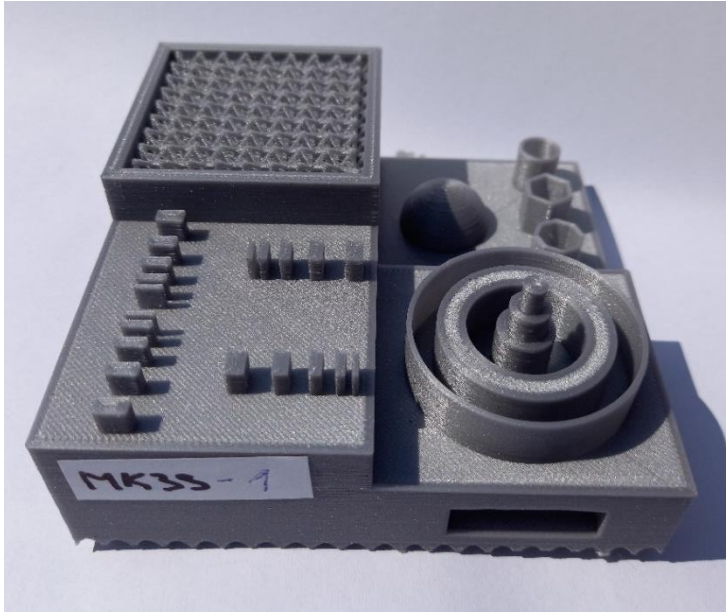


Obrázek 17 – Nepovedený výtisk artefaktu verze 2 od MK3S+

Úspěšný byl nakonec až výtisk artefaktu verze 3, také ve stejném nastavení tiskárny. Výtisk artefaktu verze 3 proběhl pro ozkoušení vícekrát, a to jak s materiálem PLA, tak i PETg. Výsledky měření byly zpracovány pro oba dva materiály.



Obrázek 18 - Artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PETg)

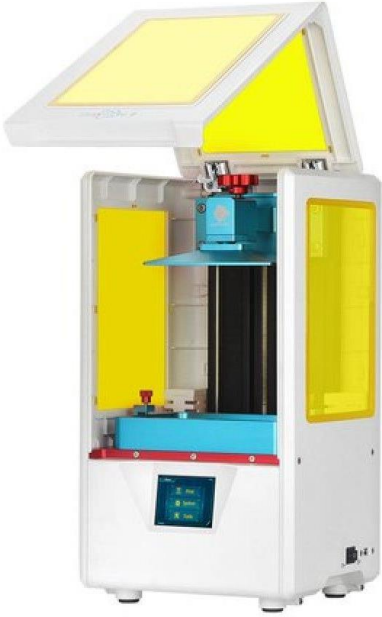


Obrázek 19 - Artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PLA)

8.3. Anycubic Photon S

Pro technologii DLP byl artefakt ve třech verzích tisknut na tiskárně Anycubic Photon S. Artefakt byl kvůli menší pracovní ploše DLP tiskáren tisknut v 60% velikost CAD modelu.

Tabulka 4 - Parametry tisku pro Anycubic Photon S

Pracovní prostor (mm)	115x65x165	
Technika	LCD Shadow Masking	
Zdroj světla	UV Matrix (405 nm)	
Rozlišení XY (μm)	47	
Velikost dílu (mm)	V1: 60x60x24,36 V2: 60x60x24,06 V3: 60x60x23,7	
Tloušťka vrstvy (mm)	0,05	
Doba expozice na dně	65	

Rychlost zatížení	150	
Doba nasvícení (s)	7	
Vzdálenost zdvihu (mm)	5	
Rychlost zdvihu (mm/min)	65	
Materiál	Anycubic UV resin	
Doba tisku (liší se v rámci minut kvůli tisku tří verzí)	Cca 1h 56m	

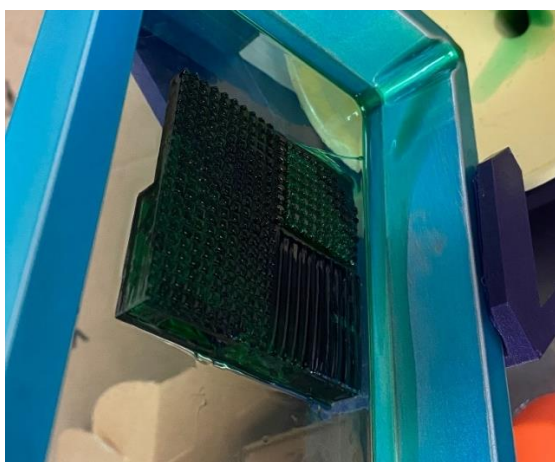
Pro artefakt verze 1 u tiskárny Anycubic Photon S nejsou skoro žádné výsledky. Jak bylo předpokládáno, tak stavební jehly nedokázaly udržet nosnost dílu ani několik minut a vše spadlo. U DLP technologií je tento problém závažnější než u FDM, už jen z principu dané technologie tisku.

Tisk artefaktu verze 2 byl o něco úspěšnější, bohužel plocha jehlanů zajišťující kontakt se stavební podložkou stále nedokázala přenést sílu potřebnou k odtržení dílu od FEP fólie na dně vaničky v okamžiku, kdy došlo k tisku 1 plné vrstvy. Artefakt se tedy přibližně v 70 % tisku nedokázal při vytvrzování a odtrhávání udržet na stavěcí podložce a přilepil se na dno vany, viz obrázky 21 a 22.

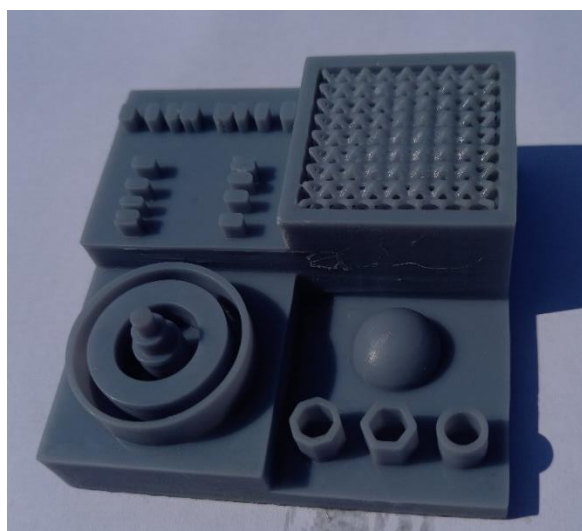
Tisk artefaktu verze 3 proběhl úspěšně a je zohledněn ve výsledcích měření. Model artefaktu verze 3 pro Anycubic Photon S lze vidět na obrázku 23.



Obrázek 21 - Přilepený artefakt verze 2 od Photon S na dně vany



Obrázek 22 - Odtržený artefakt verze 2 od Photon S



Obrázek 23 - Artefakt verze 3 od Photon S

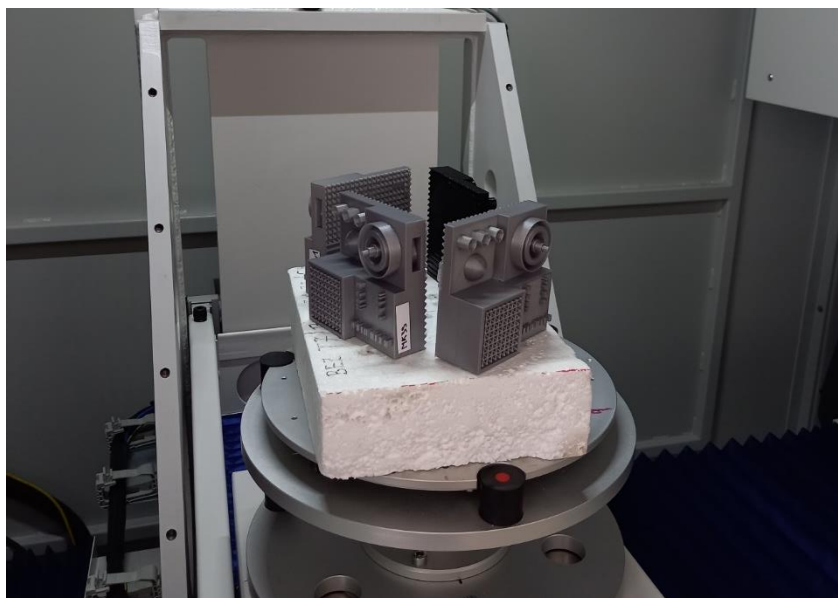
9. Vyhodnocení zkušebních těles

Pro vyhodnocení přesnosti tisku artefaktů byla použita výpočetní tomografie (CT – Computed Thomography) Jedná se o metodu nedestruktivního zkoušení, která je využívána pro 3D zobrazování testovaných objektů a jejich vnitřních struktur ve vysokém rozlišení. CT zobrazuje trojrozměrný model, který je konstruovaný ze snímků zachycených na detektoru. Testované artefakty byly upnuty na polystyrenový box (viz. obrázky) a měřeny na přístroji ZEISS METROTOM. [16]

Parametry měření lze nalézt v tabulce 5.

Tabulka 5 - Parametry měření CT

	Měření 1 (obrázek 24)	Měření 2 (obrázek 25)
Napětí (V)	180	190
Proud (μA)	1608	1134
Integrační doba (ms)	285	267
Měřítka	1,69	1,93
Voxelové rozlišení (μm)	118,31	103,83



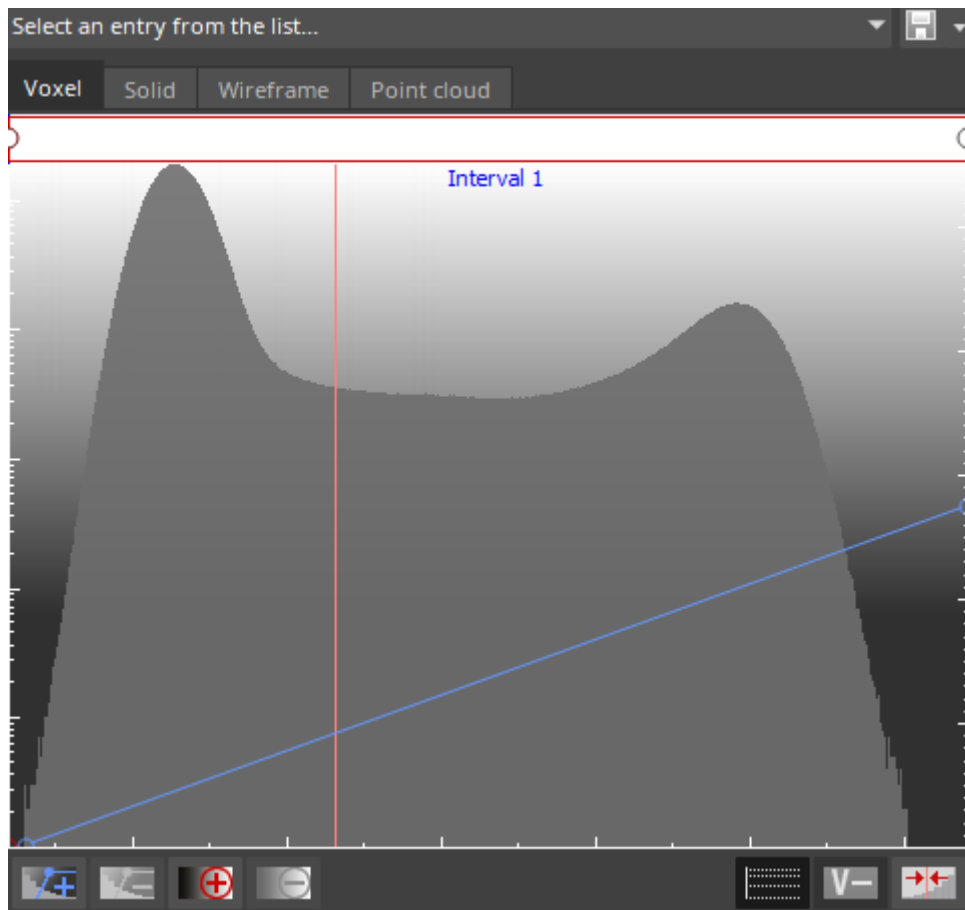
Obrázek 24 - Poskládané artefakty na první CT měření



Obrázek 25 - Poskládané artefakty na druhé CT měření

9.1. Analýza odchylek tvaru

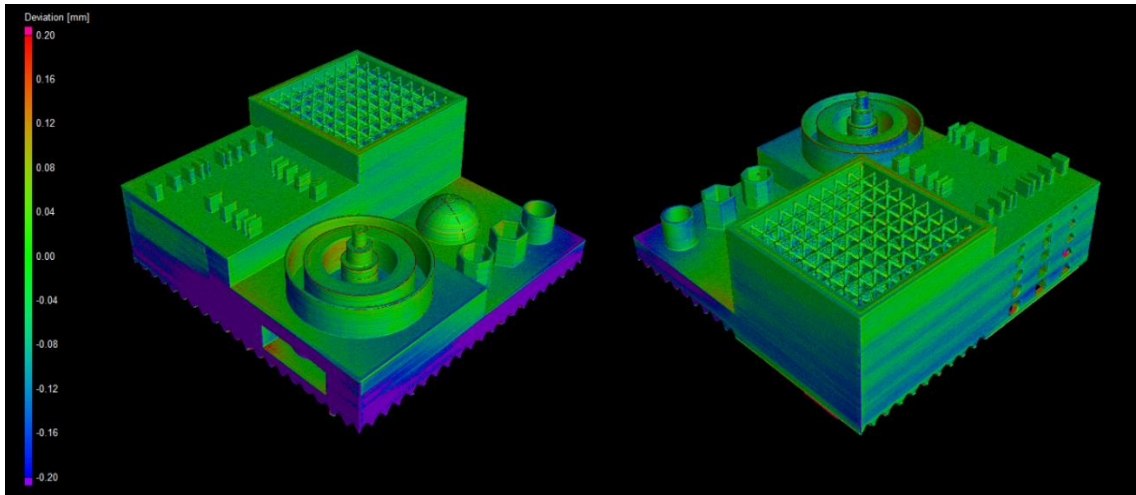
Analýza odchylek a veškerého měření byla provedena v programu VG Studio Max a následně v programu My VGL. Pro definování povrchu tělesa jsme použili hranici materiálu definovanou hodnotou šedi odpovídající hustotě měřeného materiálu (též známé jako Isosurface). Rovina je v histogramu určena svislou červenou čarou. Jedná se o prahovou hodnotu.



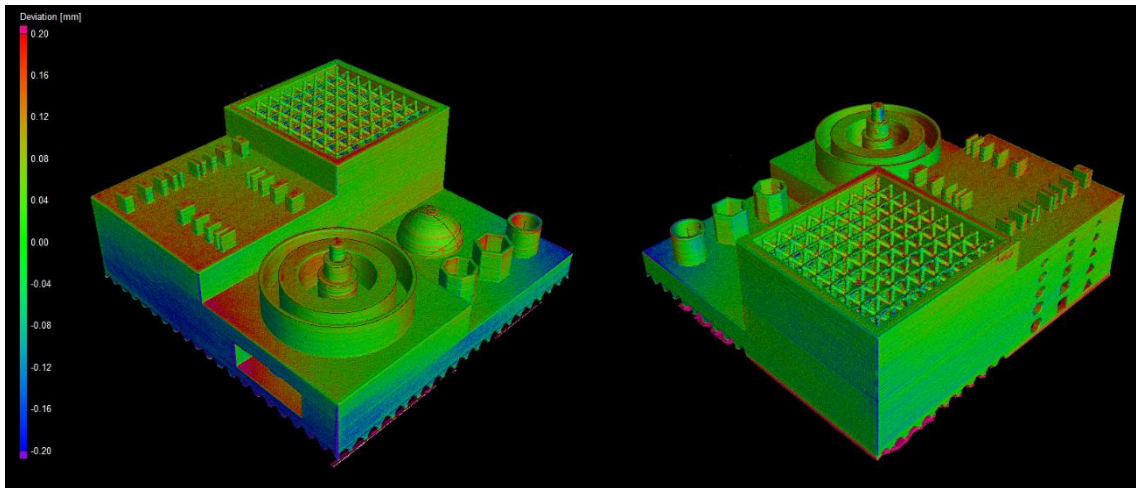
Obrázek 26 - Histogram Isosurface

Pomocí trilineární interpolace se vypočítá hranice materiálu ve voxelech. Po naskenování objektů se nahrály CAD modely a pomocí metody 3-2-1 se vyrovnali s modely naměřenými. Takto můžeme porovnat nominální hodnotu s hodnotou naměřenou.

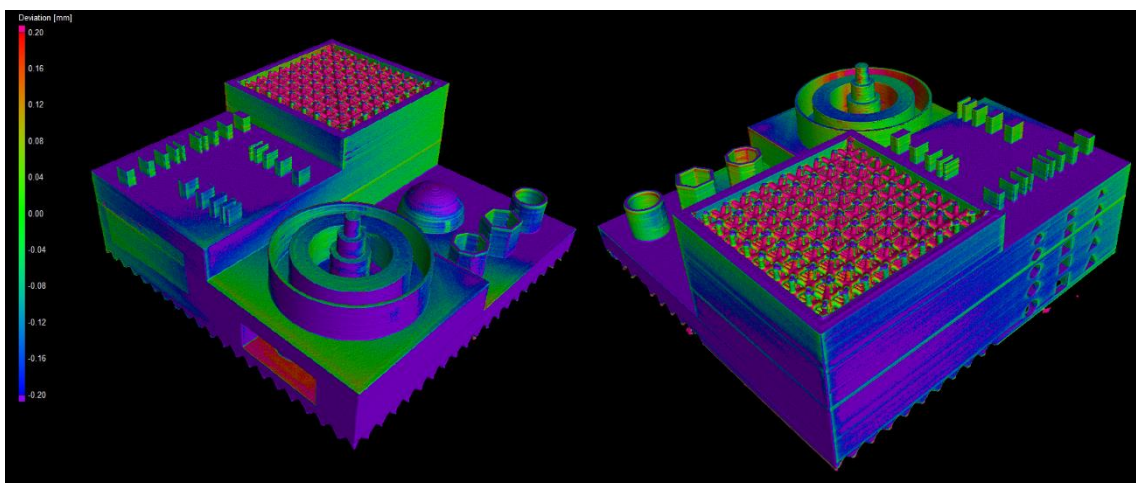
Analýza odchylek byla provedena u všech naměřených modelů ve dvou pohledech. Tato analýza zobrazuje barevné odchylky výtisků vůči nominálnímu modelu. Pokud třeba srovnáme odchylky pro model od MK3S+ (obrázek 27) proti modelu od MINI+ (obrázek 29), jsou na první pohled patrné rozdíly.



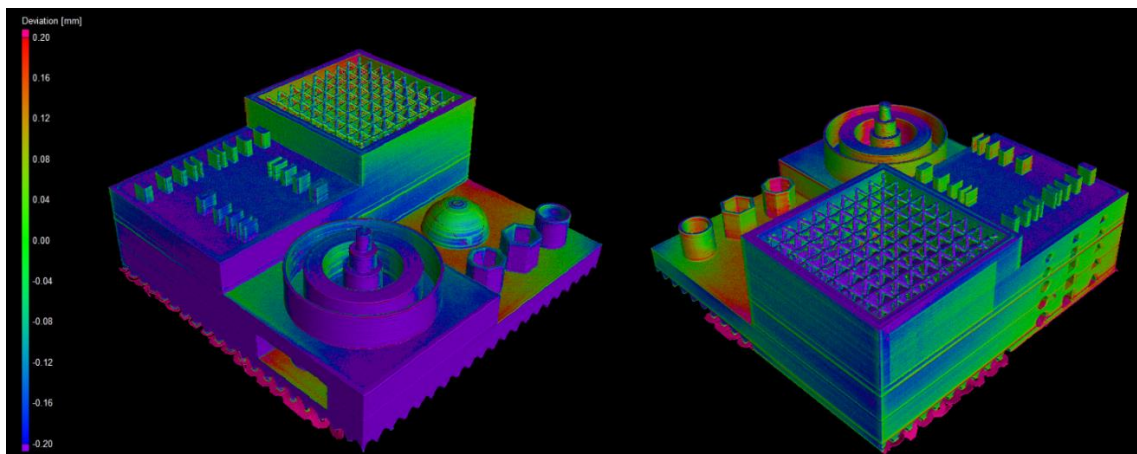
Obrázek 27 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PLA)



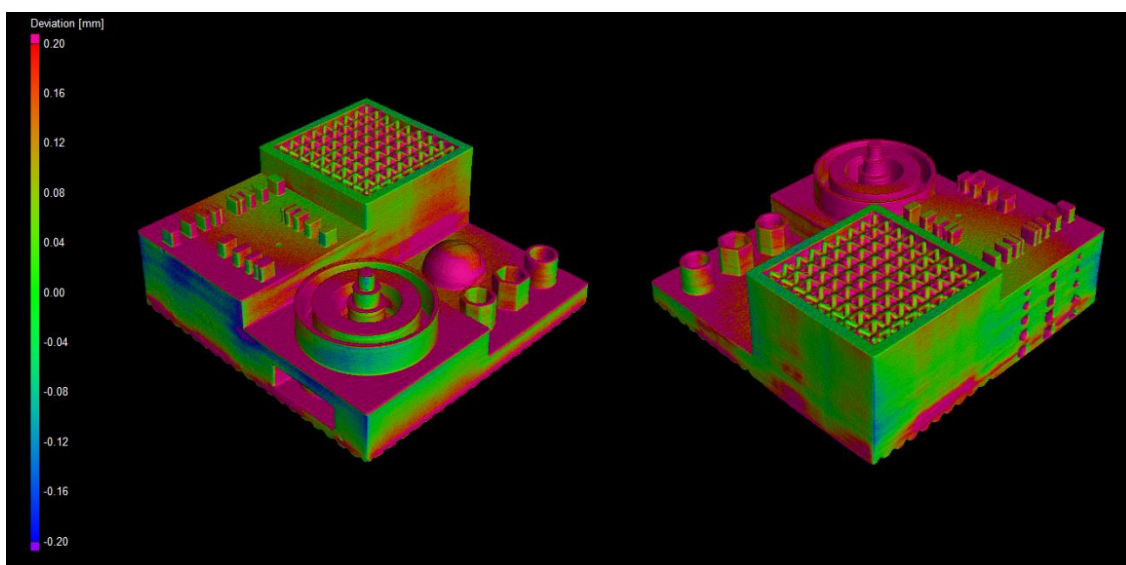
Obrázek 28 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PETg)



Obrázek 29 - Analýza odchylek pro artefakt verze 1 od MINI+



Obrázek 30 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od MINI+



Obrázek 31 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od Photon S

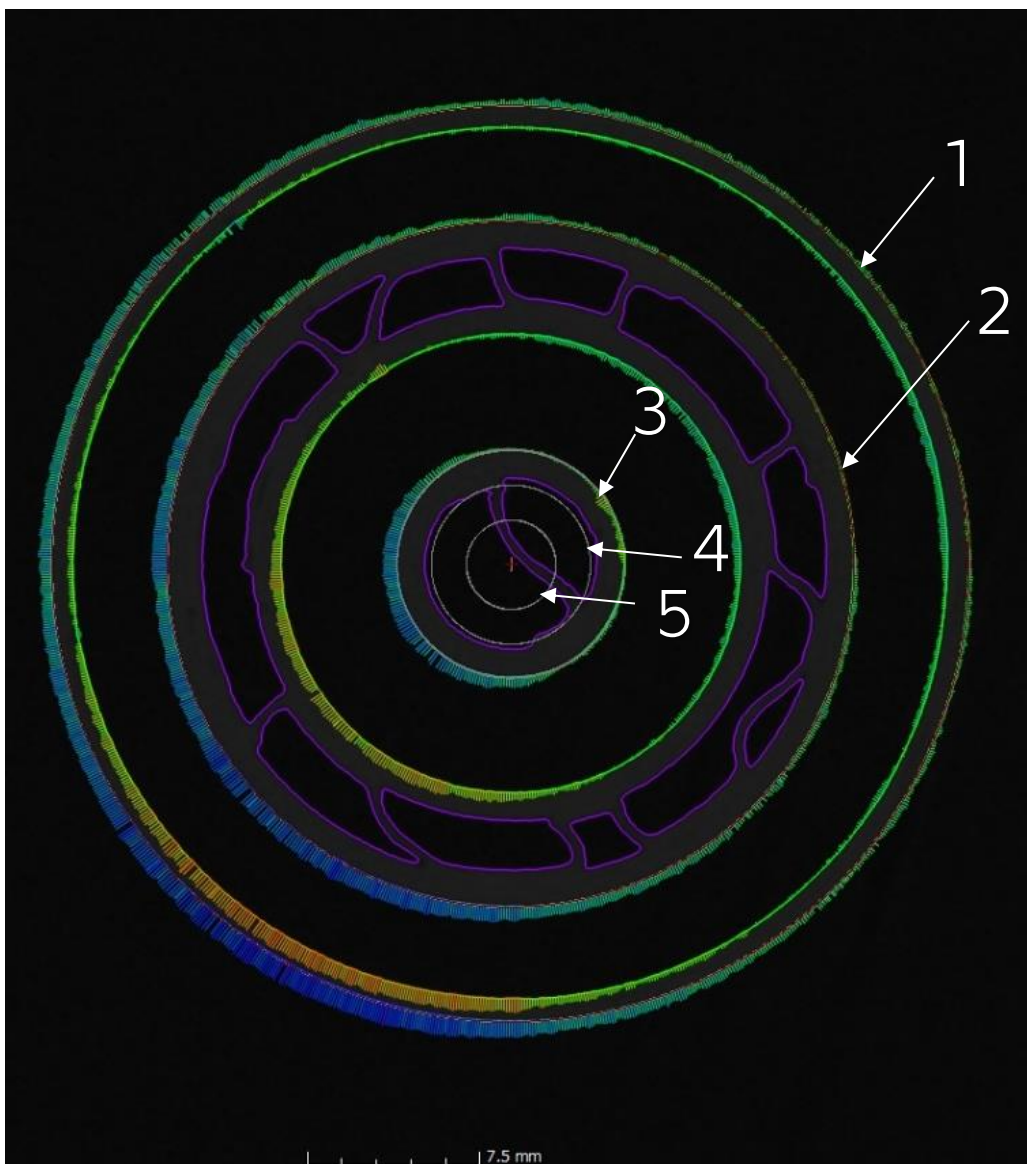
Z přiložených obrázků lze pozorovat a porovnat odchýlení různých výtisků od nominálního modelu. Nejvíce přesný výtisk odpovídá tiskárně Original Prusa MK3S+ pro materiál PLA a PETg. Také lze vidět, že výtisky z tiskárny Original Prusa MINI+ jsou celkově menší než nominální model. Odchytky pro tiskárnu MK3S+ se pohybují do $\pm 0,1$ mm. U tiskárny MINI+ se jedná o odchytky tolerancí v rámci $\pm 0,2$ mm a více. Dokonce v některých částech lze vidět i překročení tolerance $\pm 0,5$ mm (například u některých rovin od MINI+).

Na první pohled je vidět, že tiskárna MINI+ u obou tištěných verzí artefaktu má přibližně v polovině stavby modelu deformaci. Tato deformace posouvá model o pár milimetrů mimo nominální hodnotu.

Na obrázku 31 je pro porovnání ukázka analýzy odchylek výtisku pomocí technologie DLP.

9.2. Kruhová část

Prvek kruhové části slouží k ověření možnosti tisku malých a větších průměrů. Na obrázku 32 můžeme vidět analýzu odchylek a rozměrů pro artefakt. Obrázek odkazuje na tabulku výsledků, které byly automaticky naměřeny v porovnání s nominálním modelem v programu VG Studio Max. Lze pozorovat geometrické a rozměrové nepřesnosti tisku. Ostatní artefakty byly měřeny stejným způsobem.



Obrázek 32 – Ukázka měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (analýza kruhové části)

Tabulka 6 - Výsledky měření kruhové části

Kruhový prvek	Model FDM (mm)	MK3S+ PLA (mm)	MK3S+ PETg (mm)	MINI+ v1 (mm)	MINI+ v3 (mm)	Model DLP (mm)	Photon S (mm)
1	20	19,93	20,1	19,89	19,89	12	12,11
2	15	14,93	15,02	14,88	14,92	9	9,17
3	5	4,95	5,04	4,93	4,93	3	3,21
4	3,5	3,46	3,54	3,41	3,43	2,1	2,30
5	2	1,95	1,98	1,89	1,88	1,2	1,38

Detailní měření kruhové části ukazuje, že artefakt verze 1 od MINI+ má největší odchýlení od nominálního modelu. To je zapříčiněno tím, že se jedná o jediný výtisk artefaktu verze 1 a stavební jehlany modelu nejsou dostatečnou podporou. Nejlépe vychází měření artefaktu verze 3 od MK3S+ s materiálem PETg, zároveň se taky jedná o jediný model z FDM, který má kruhové pole větší než nominální hodnotu. Pro technologii DLP vychází odchylky v poměru výrazně vyšší než u FDM.

9.3. Polokoule

Prvek polokoule pomáhá určit kvalitu tisku, a to především u menších dílů. Z analýzy odchylek celého modelu jsou patrné nepřesnosti. Ukázkou z měření lze vidět na obrázku 33.



Obrázek 33 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (analýza polokoule)

Měření proběhlo také automaticky v programu VG Studio Max a všechna data jsou zaznamenána v tabulce 7

Tabulka 7 - Výsledky měření polokoule

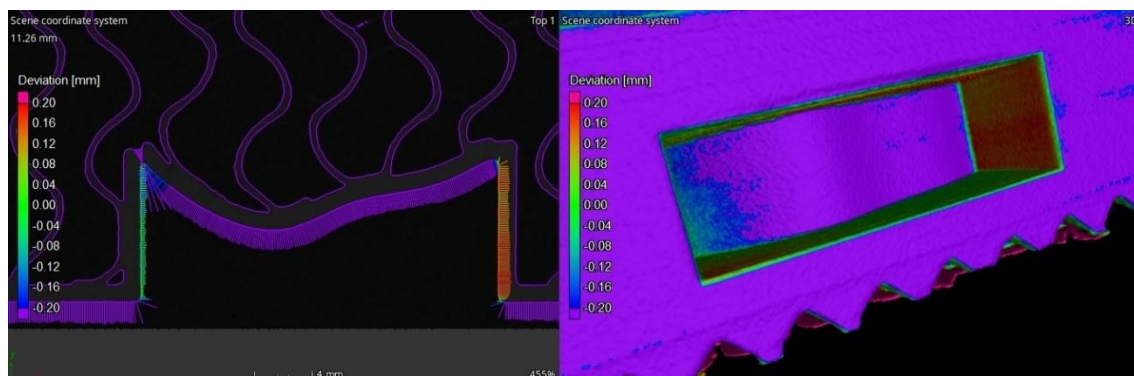
Polokoule	Model FDM (mm)	MK3S+ PLA (mm)	MK3S+ PETg (mm)	MINI+ v1 (mm)	MINI+ v3 (mm)	Model DLP (mm)	Photon S (mm)
1	10	9,97	10,4	9,93	10,3	6	6,19

Už z vizuální kontroly viz. analýza odchylek můžeme vidět, že stanovené kvality tisku nejlépe odpovídá výtisk artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA a MINI+. Po detailním měření viz. tabulka 7, vidíme, že odchylka těchto dvou výtisků je stejná. Rozdílem je však, že artefakt verze 3 od MINI+ je větší než nominální hodnota a artefakt verze 3 od MK3S+ je menší.

9.4. Vlna

Cílem toho prvku na artefaktu je dosáhnoutí vlny bez viditelných kroků. Jedná se především o vizuální zkoušku a důležité je, aby vlna co nejlépe kopírovala

nominální model. Na obrázku 34 můžeme vidět ukázkou manuálního průběhu měření v programu My VGL.




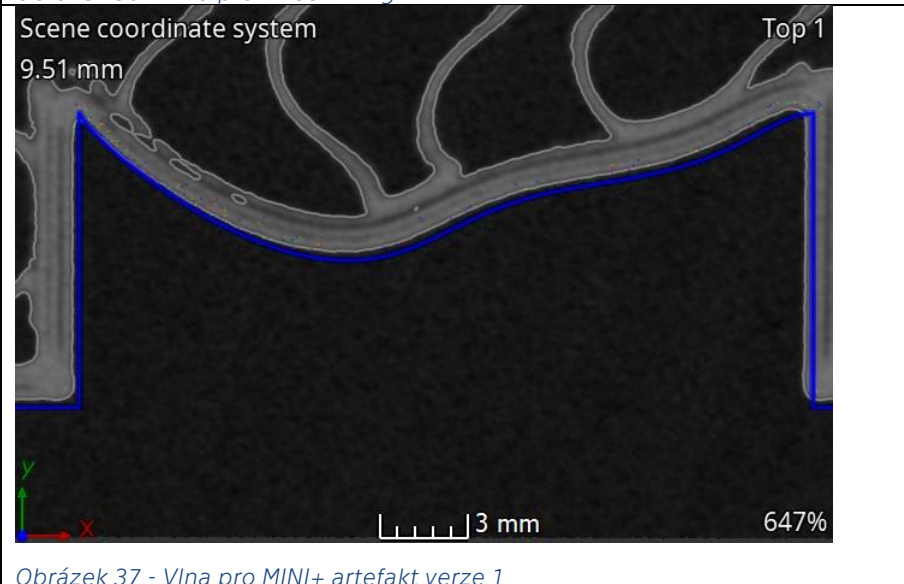
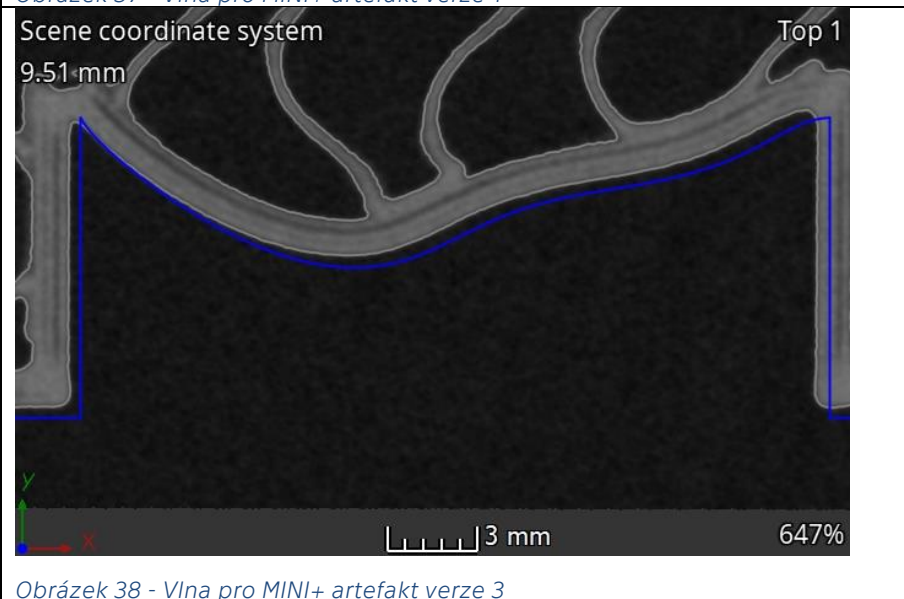
Obrázek 34 - Ukázkou měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (analýza vlny)

Výsledkem je tabulka 8, ve které jsou jednotlivé výtisky porovnány mezi sebou (modrá / oranžová čára je nominální model).

Tabulka 8 - Porovnání zvlněné plochy mezi jednotlivými tiskárnami



Obrázek 35 - Vlna pro MK3S+ PLA

<p>MK3S+ PETg</p>	
<p>MINI+ v1</p>	
<p>MINI+ v3</p>	

Obrázek 36 - Vlna pro MK3S+ PETg

Obrázek 37 - Vlna pro MINI+ artefakt verze 1

Obrázek 38 - Vlna pro MINI+ artefakt verze 3

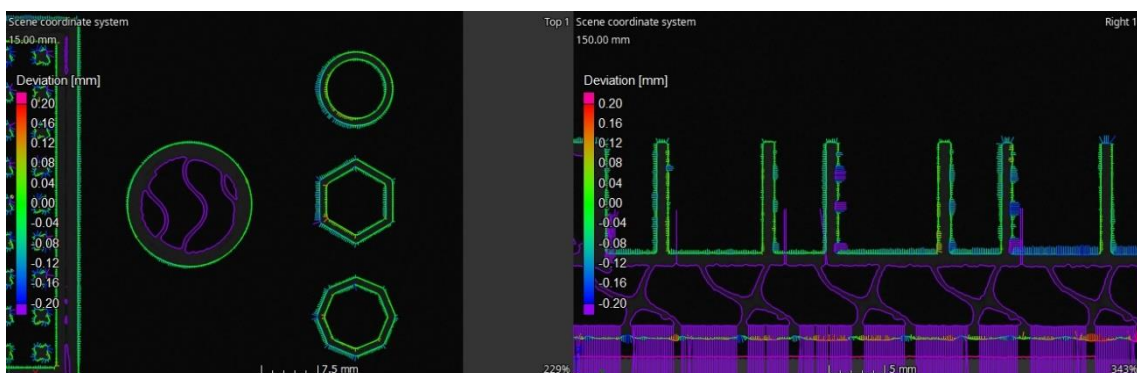


Obrázek 39 - Vlna pro Photon S artefakt verze 3

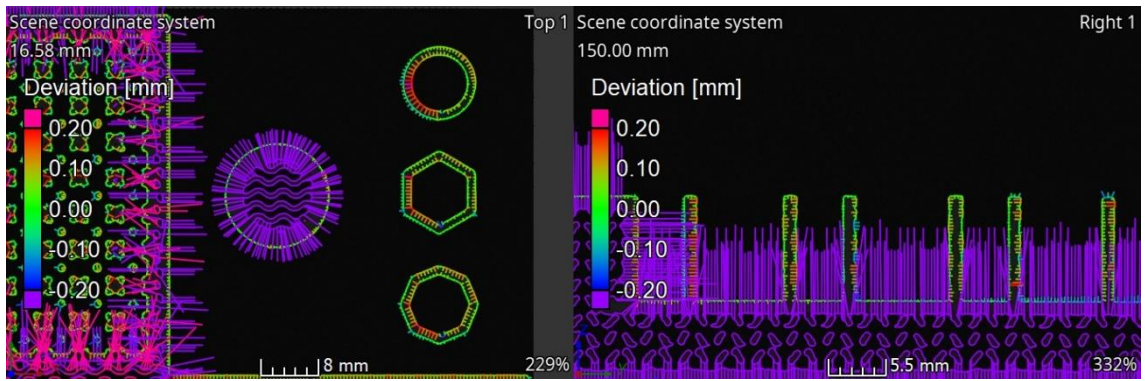
Ze snímků porovnaných v tabulce 8 má nejlepší zvlněnou plochu artefakt verze 3 od MK3S+ PETg, jen mírně se liší od nominálního modelu. Překvapivě výtisk artefaktu verze 3 od Photon S pro technologii DLP je vychýlen více, než bylo předpokládáno. To může být zapříčiněno zvolením příliš velké doby expozice.

9.5. Válce

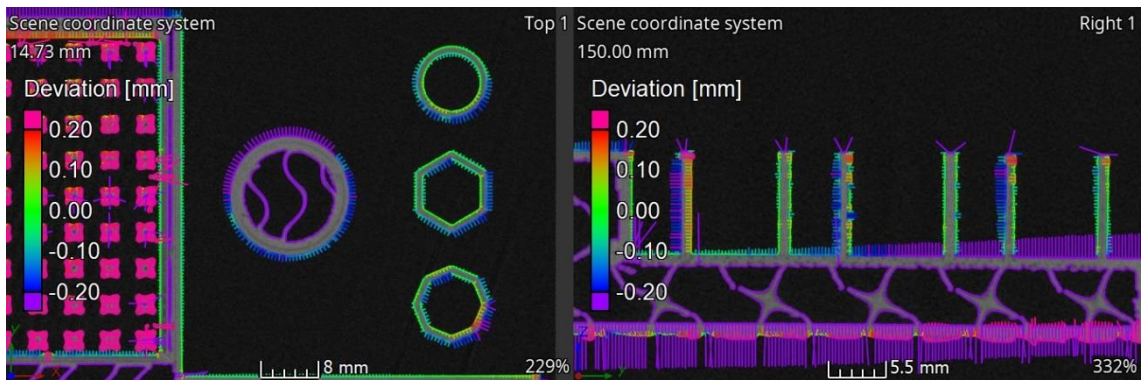
Válce slouží k vyhodnocení odchyly od nominálního modelu a porovnání deformací mezi čistým válcem, šestihranem a osmihranem.



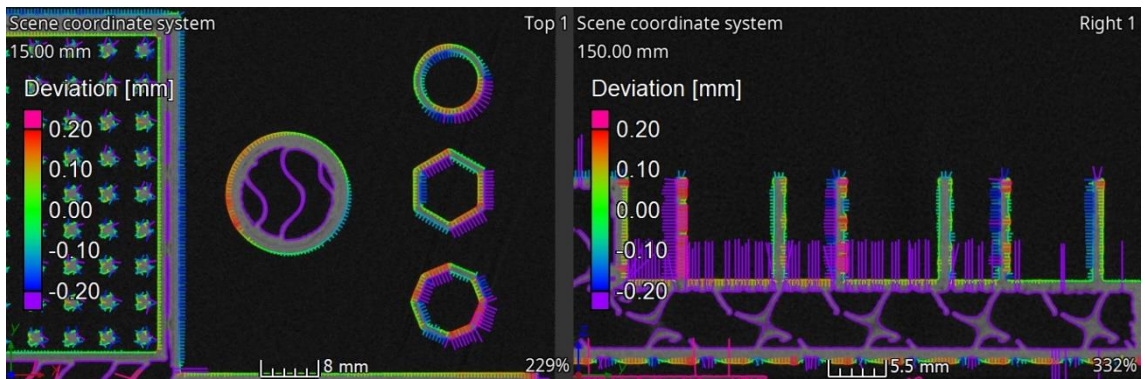
Obrázek 40 - Odchyly měření válců pro artefakt verze 3 od MK3S+ PLA



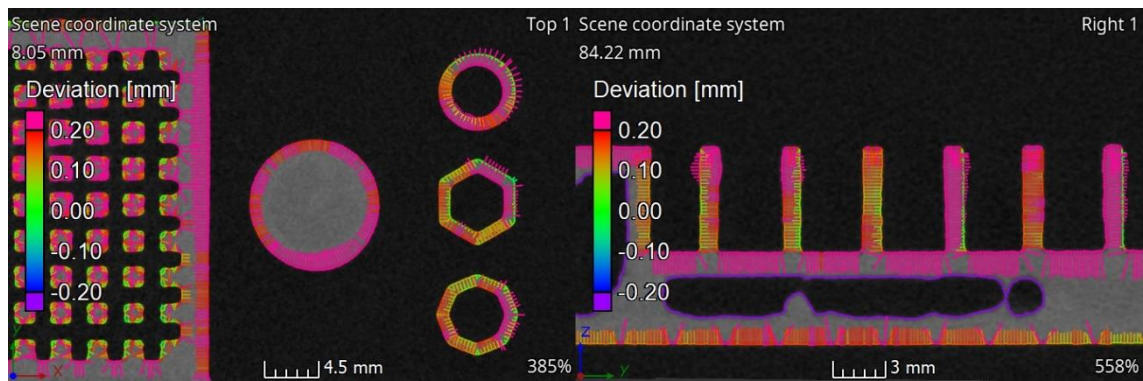
Obrázek 41 - Odchyly měření válců pro artefakt verze 3 od MK3S+ PETg



Obrázek 42 - Odchyly měření válců pro artefakt verze 1 od MINI+



Obrázek 43 - Odchyly měření válců pro artefakt verze 3 od MINI+



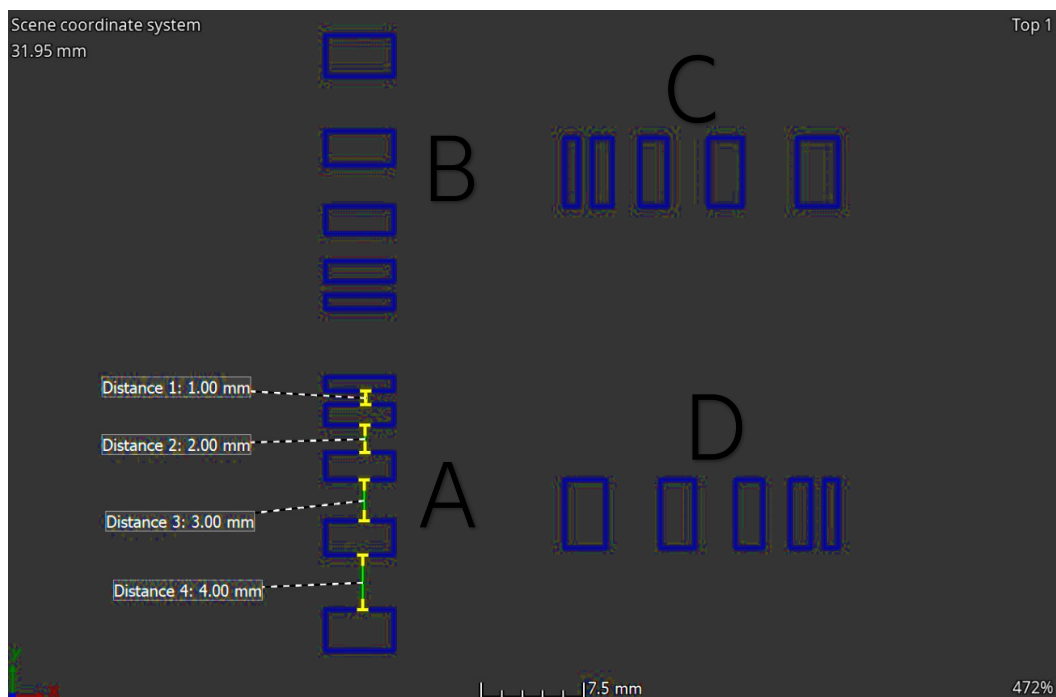
Obrázek 44 - Odchylky měření válců pro artefakt verze 3 od Photon S

Výsledky měření pokračují v trendu v prospěch tiskárny Original Prusa MK3S+ s artefaktem verze 3 z PLA. Z porovnání je patrné, že všechny tiskárny technologie FDM dokáží bez velkých problémů tyto prvky vytisknout. U tiskárny MK3S+ se odchylky jeví maximálně v hodnotách $\pm 0,1$ mm, kdežto u tiskárny MINI+ se dostáváme do hodnot $\pm 0,2$ mm a více.

Pozoruhodným zjištěním je, že výtisk artefaktu verze 1 z MINI+ je výrazně lepší oproti výtisku artefaktu verze 3 z téže tiskárny.

9.6. Sloty

Pro manuální měření slotů byl vytvořen postup měření a značení, který lze vidět na obrázku 45. Příklad značení odpovídá vždy danému písmenu a k němu přiřazenému číslu, které je stejné jak velikost mezery slotu.



Obrázek 45 - Princip postupného zapisování výsledných hodnot při měření odchylek slotů

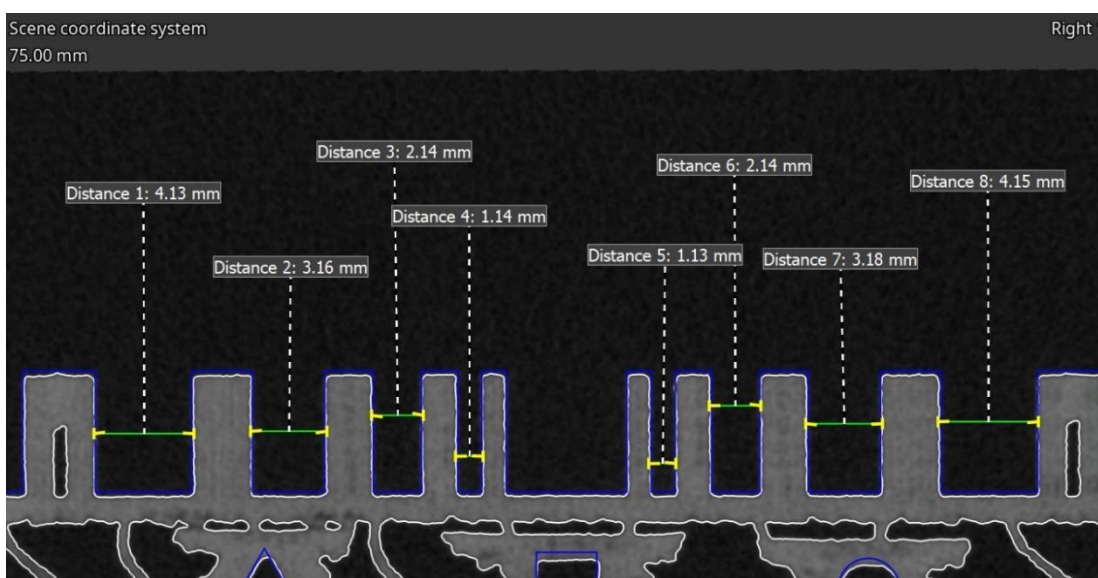
Výsledky z měření, které probíhalo manuálně v programu My VGL lze vidět v tabulce 9.

Tabulka 9 - Výsledky měření slotů

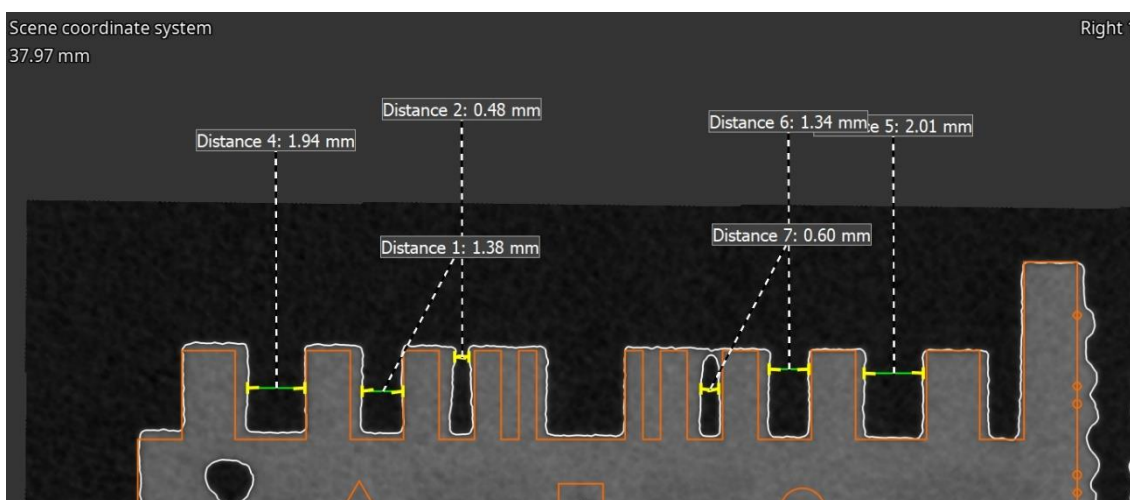
Název pořadí slotu	a	Nominální model FDM (mm)	MK3S+ PLA (mm)	MK3S+ PETg (mm)	MINI+ v1 (mm)	MINI+ v3 (mm)	Nominální model DLP (mm)	Photon S
A4	4	4	4,13	3,90	4,15	4,13	2,4	1,94
A3	3	3	3,10	2,92	3,17	3,16	1,8	1,38
A2	2	2	2,12	1,84	2,13	2,14	1,2	0,48
A1	1	1	1,14	0,88	1,17	1,14	0,6	0
B4	4	4	4,13	3,93	4,16	4,15	2,4	2,01
B3	3	3	3,08	2,91	3,16	3,18	1,8	1,34
B2	2	2	2,12	1,90	2,14	2,14	1,2	0,6
B1	1	1	1,09	0,94	1,13	1,13	0,6	0
C4	4	4	4,12	3,92	4,13	4,15	2,4	2,14
C3	3	3	3,16	2,88	3,14	3,13	1,8	1,37
C2	2	2	2,09	1,93	2,13	2,14	1,2	0,62
C1	1	1	1,14	1,1	1,13	1,15	0,6	0
D4	4	4	4,12	3,96	4,15	4,12	2,4	2,11

D3	3	3,11	2,95	3,14	3,11	1,8	1,47
D2	2	2,07	1,95	2,13	2,12	1,2	0,85
D1	1	1,11	0,94	1,11	1,10	0,6	0

Z tabulky výsledků měření děláme závěr, že nejlépe vytisknuté sloty má tiskárna MK3S+ s artefaktem verze 3 PLA. Srovnatelné hodnoty byly naměřeny i u artefaktu verze 3 od MINI+ (obrázek 46). Výsledky tisku pomocí technologie DLP ukazují, že rozlišení tiskárny nezvládlo detailnější rozložení slotů. Na obrázku 47 můžeme vidět, že sloty jsou zdeformované a poslední dokonce celé slité dohromady.



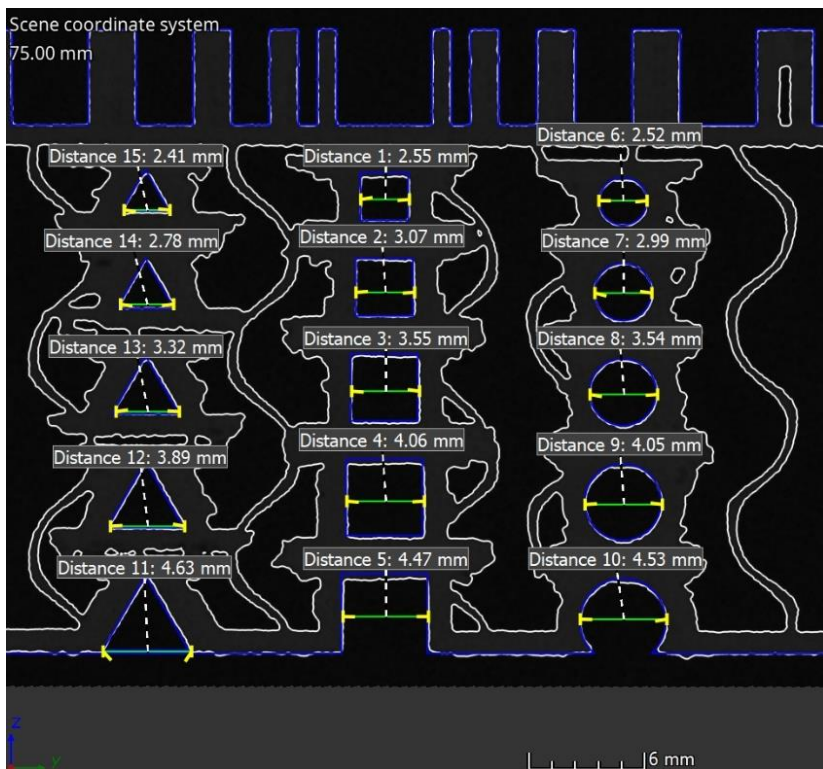
Obrázek 46 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od MINI+ (měření slotů)



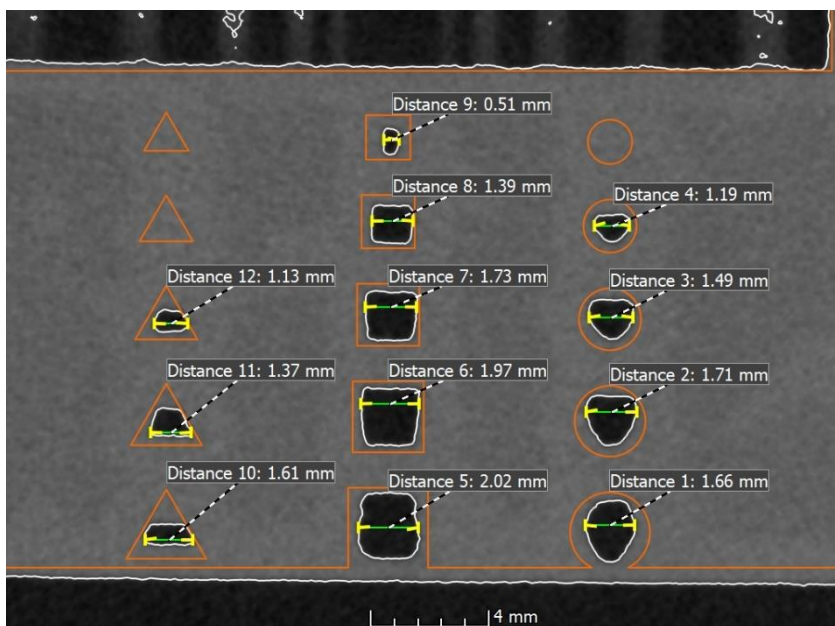
Obrázek 47 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od Photon S (měření slotů)

9.7. Otvory

U měření otvorů jde především o správný tvar a dodržení rozměrové přesnosti. Měření proběhlo manuálně (obrázky 48 a 49) a výsledky byly zaznamenány v tabulce 10.



Obrázek 48 – Ukázka měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (měření odchylek otvorů)



Obrázek 49 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od Photon S (měření odchylek otvorů)

Na obrázku 49 vidíme měření otvorů pro technologii DLP. Všechny otvory jsou zdeformovány a některé slity dohromady. To je zapříčiněno nesprávným nastavením tisku, a to konkrétně dobou expozice, která je příliš dlouhá.

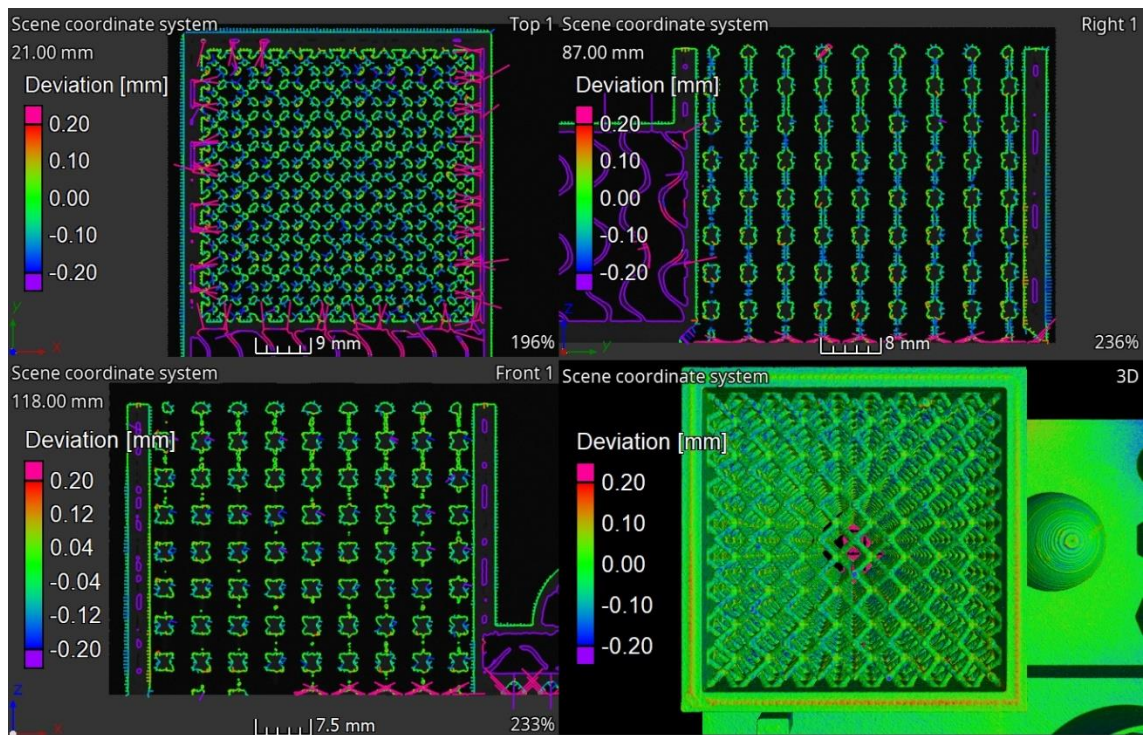
Tabulka 10 - Výsledky měření odchylek otvorů

Název otvoru	Nominální model FDM (mm)	MK3S+ PLA (mm)	MK3S+ PETg (mm)	MINI+ v1 (mm)	MINI+ v3 (mm)	Nominální model DLP (mm)	Photon S (mm)
Kruh1	4,5	4,53	4,43	4,57	4,54	2,7	1,66
Kruh2	4	4,05	3,94	4,03	3,99	2,4	1,71
Kruh3	3,5	3,54	3,39	3,57	3,49	2,10	1,49
Kruh4	3	2,99	2,87	3,01	3,08	1,8	1,19
Kruh5	2,5	2,52	2,40	2,53	2,58	1,5	0
Čtverec1	4,5	4,47	4,45	4,57	4,57	2,7	2,02
Čtverec2	4	4,06	3,90	4,11	4,09	2,4	1,97
Čtverec3	3,5	3,55	3,45	3,52	3,61	2,10	1,73
Čtverec4	3	3,07	2,94	3,09	2,90	1,8	1,39
Čtverec5	2,5	2,55	2,40	2,60	2,61	1,5	0,51
Trojúhelník1	4,5	4,63	4,48	4,61	4,39	2,7	1,61
Trojúhelník2	4	3,89	3,7	3,88	3,93	2,4	1,37
Trojúhelník3	3,5	3,32	3,2	3,42	3,45	2,10	1,13
Trojúhelník4	3	2,78	2,45	2,86	2,86	1,8	0
Trojúhelník5	2,5	2,41	2,14	2,41	2,41	1,5	0

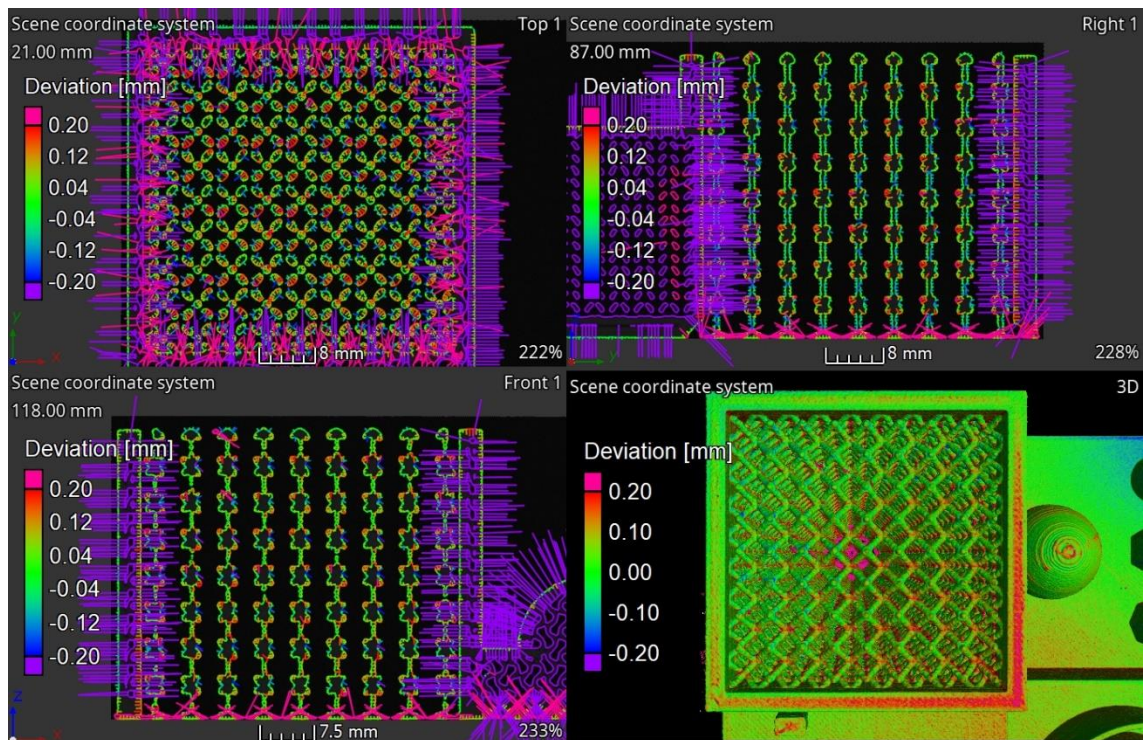
Jako bylo předpokládáno, s nejhorsími výsledky vyšly otvory typu trojúhelník.

9.8. Lattice structure

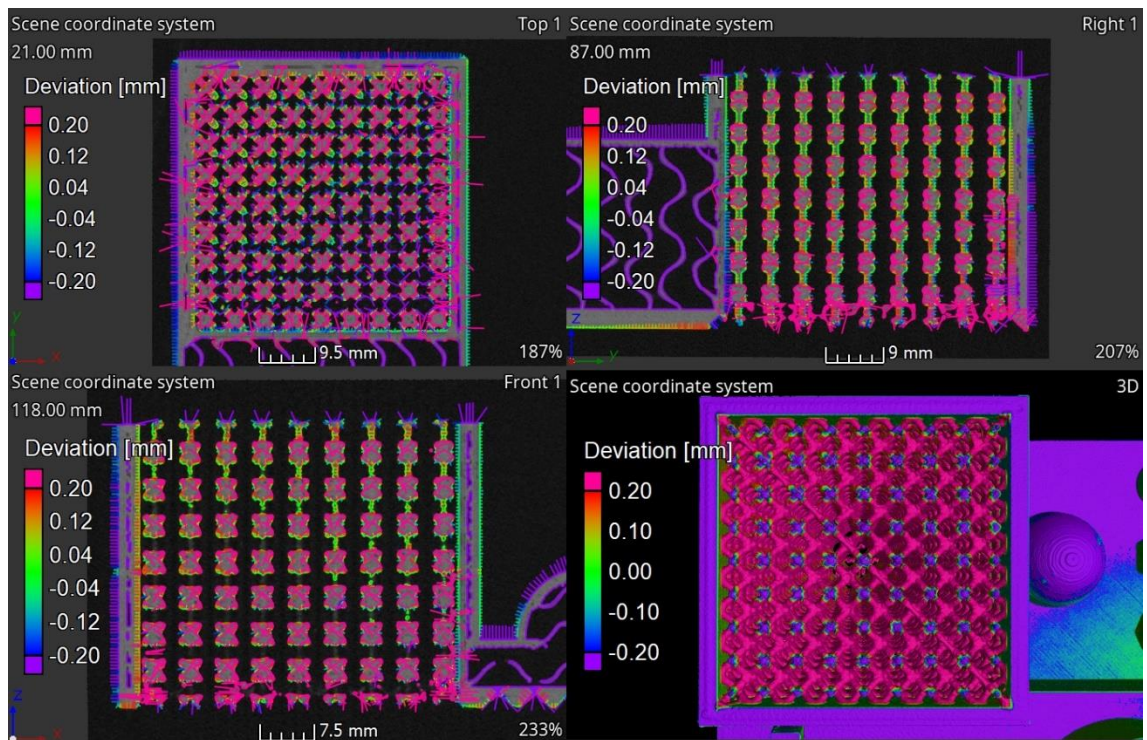
Hodnocení lattice structure je vizuální a na základně odchylek tvaru. Artefakty z tiskárny MK3S+ mají zřejmě čistší a kvalitnější mřížkovou strukturu než výsledky z MINI+. Především tedy artefakt verze 3 od MK3S+ PLA (obrázek 50). Na druhou stranu u artefaktu verze 3 od Photon S (obrázek 54), tisknutého technologií DLP je vidět, že resin se uvnitř mřížkové struktury ani nerozpustil. Uvnitř nalepený resin se nepodařilo odstranit ani propláchnutím.



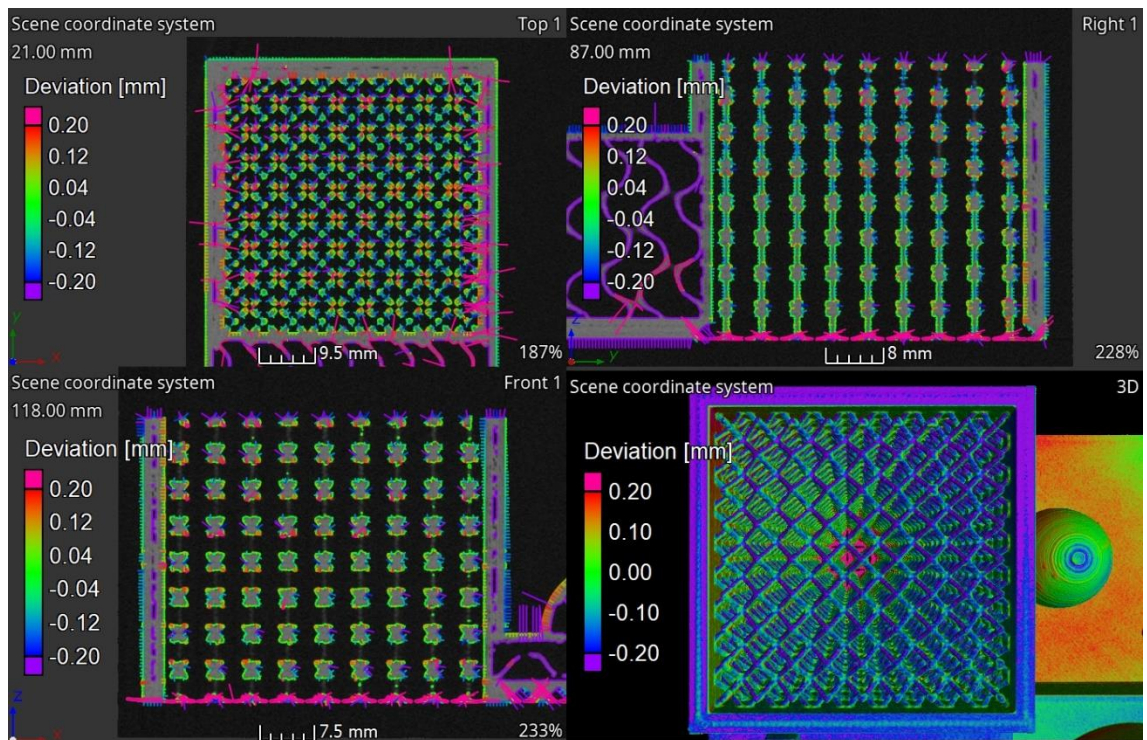
Obrázek 50 - Lattice structure artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA



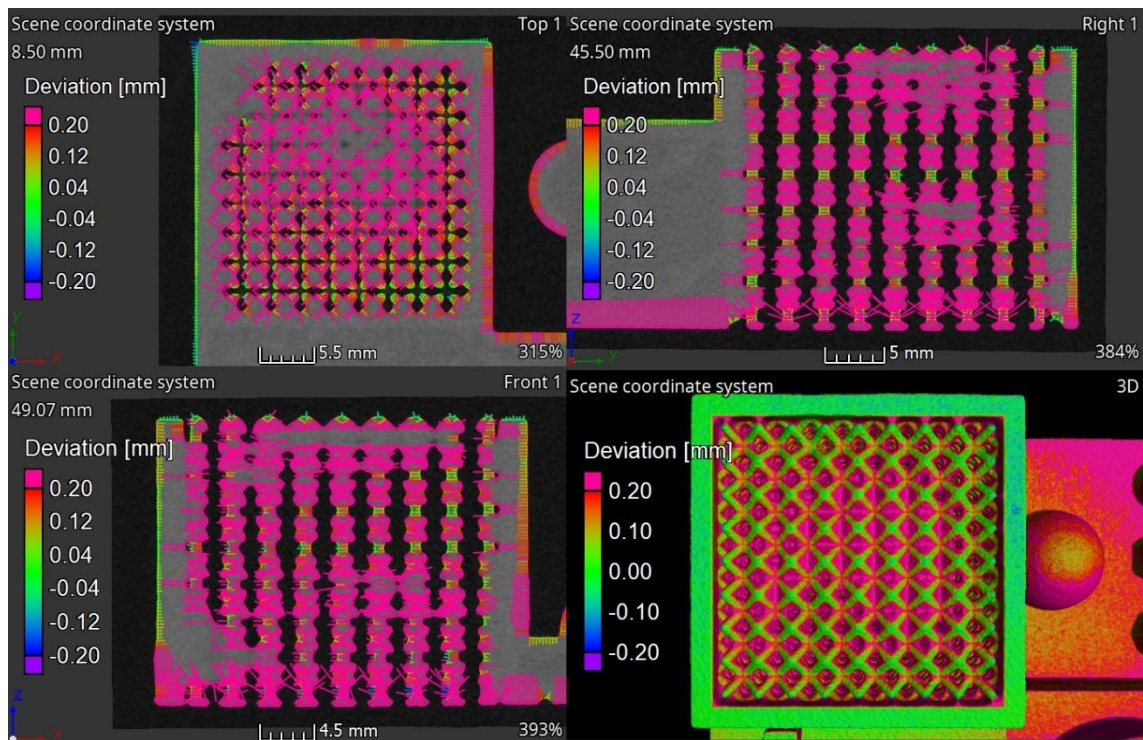
Obrázek 51 - Lattice structure artefaktu verze 3 od MK3S+ PETG



Obrázek 52 - Lattice structure artefaktu verze 1 od MINI+



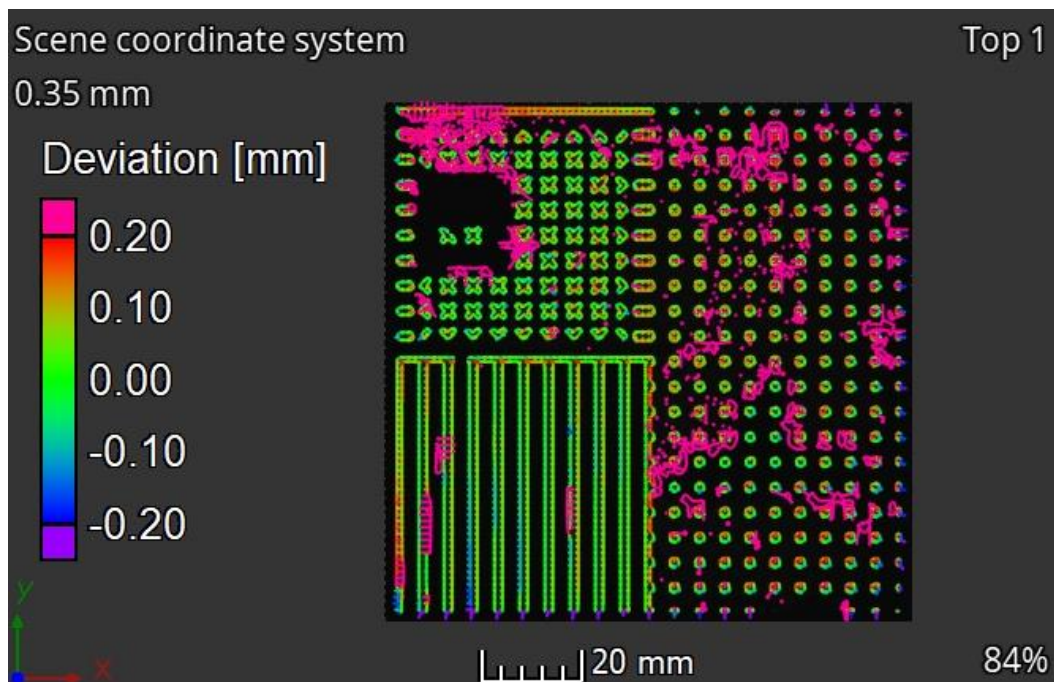
Obrázek 53 - Lattice structure artefaktu verze 3 od MINI+



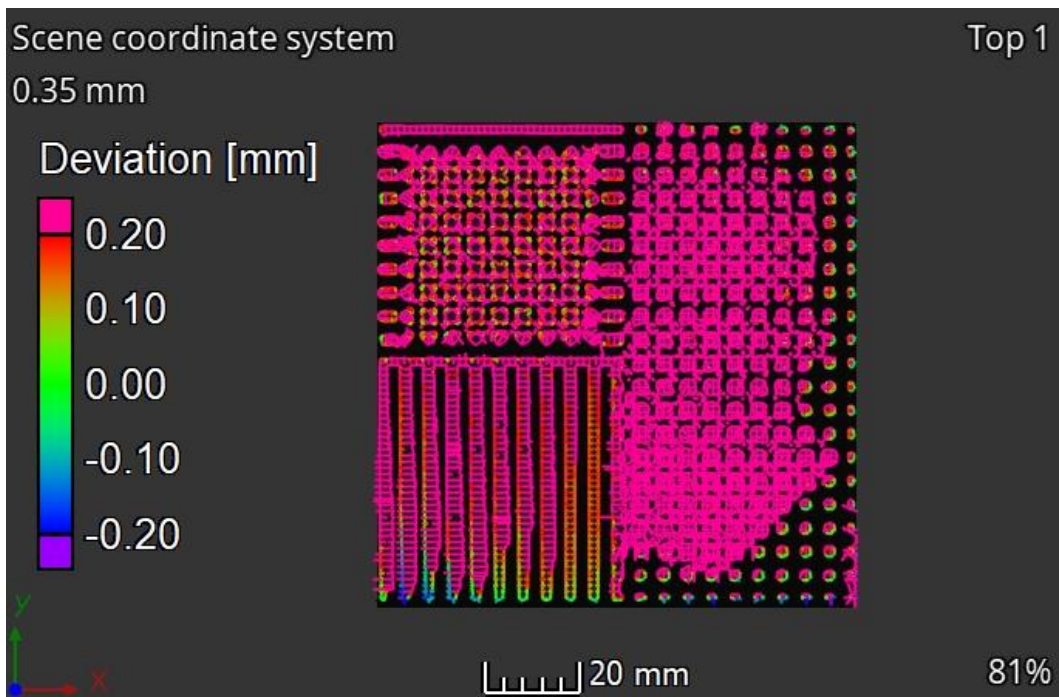
Obrázek 54 - Lattice structure artefaktu verze 3 od Photon S

9.9. Stavební jehlany

Stavební jehlany byly navrženy jako zkoušku realizovatelnosti tisku. Poměrně čisté jehlany bez větších rozhození můžeme vidět na artefaktu verze 3 od MK3S+ (obrázek 55).

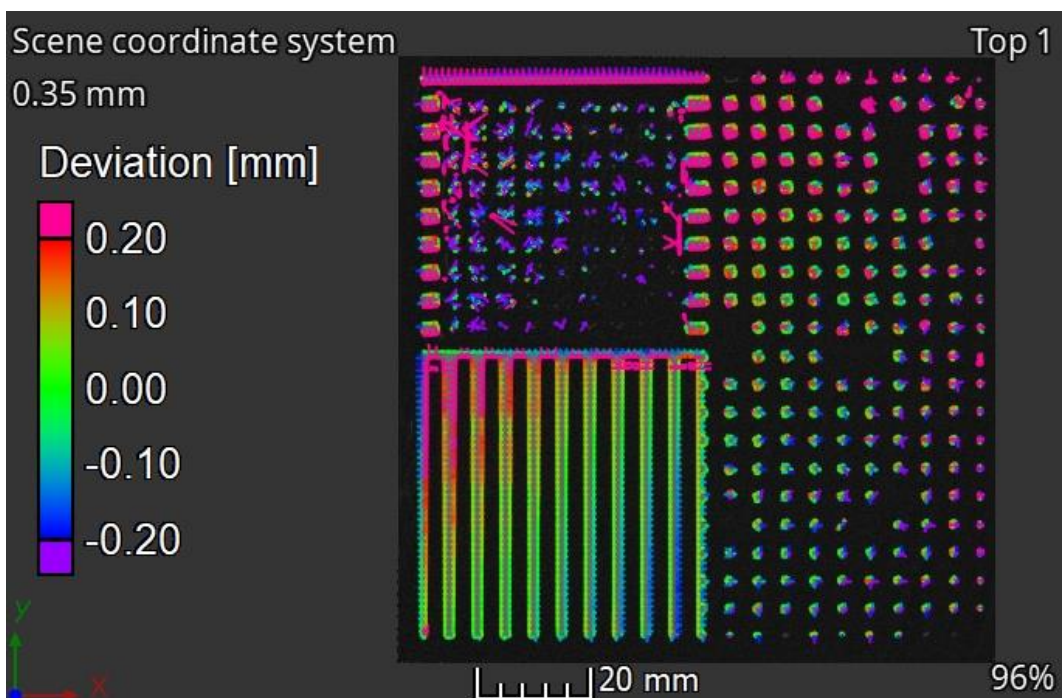


Obrázek 55 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA

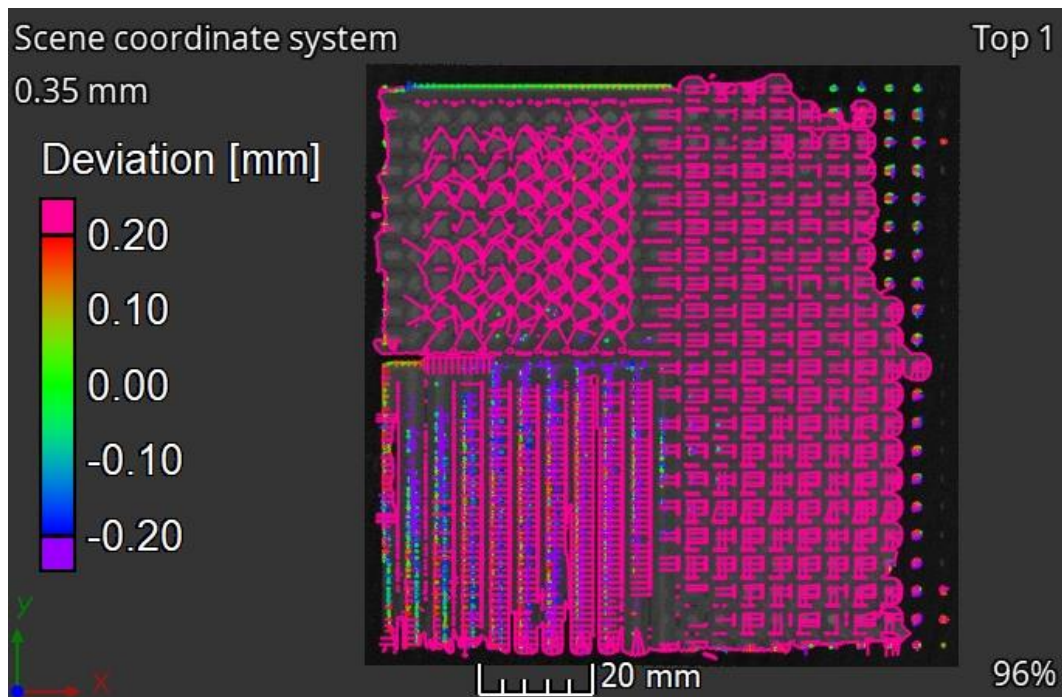


Obrázek 56 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od MK3S+ PETg

Na obrázku 57 je jediný výtisk artefaktu verze 1. V tomto případě jehlany na nové podložce pro tiskárnu MINI+ udržely váhu modelu, a to bez větších odchylek a podpor.

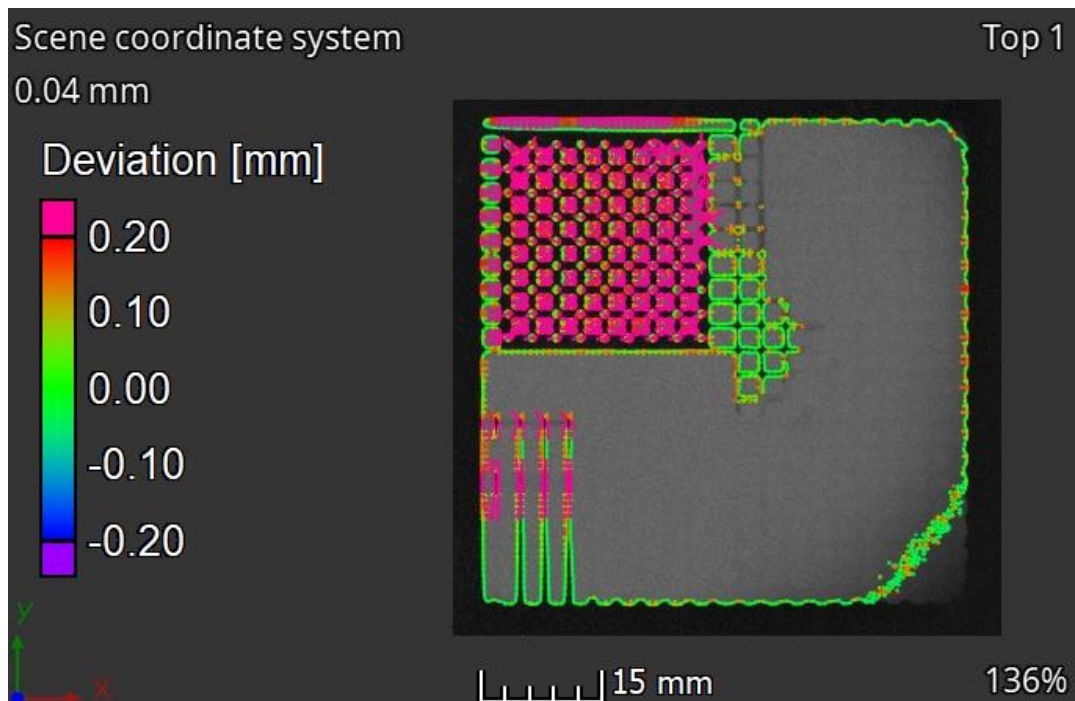


Obrázek 57 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 1 od MINI+



Obrázek 58 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od MINI+

Technologie DLP zastoupená tiskárnou Photon S při tisku artefaktu verze 3 (obrázek 59) většinou jehlanů slila a vytvrdila dohromady. Této chybě se lze nejspíše vyhnout nastavením větší expozice na dně. V tomto konkrétním případě zvýšit dobu expozice na dně přibližně o polovinu.



Obrázek 59 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od Photon S

10. Technicko-ekonomické vyhodnocení

Vyhodnocení jednotlivých kritérií viz. tabulka 11 proběhlo na základě hodnocení pořadí. Z výsledků v tabulce je patrné, že nejlépe hodnocenou tiskárnou na základně měření je tiskárna Original Prusa MK3S+ s materiálem PLA. Jedinými mínus je dvakrát vyšší cena než u tiskárny MINI+. Cena tiskárny MK3S+ se momentálně pohybuje okolo 27 000 Kč (nebo 20 000 Kč ve verzi stovebnice) zatímco MINI+ stojí 11 000 Kč.

Tisk na tiskárně MK3S+ s materiálem PETg měl podobné výsledky jako PLA, ale všechna měření ukázala, že vytisknutý model je menší než nominální. Proto bylo hodnocení ku prospěchu materiálu PLA z důvodu toho, že vždy je lepší materiál následně odebrat.

Tiskárna MINI+ jako jediná dokázala vytisknout všechny verze artefaktů, během měření byly odchylky u některých částí totožné s MK3S+, ale například zaostává v oblasti lattice structure. Také u všech výtisků byla zaznamenána deformace v polovině artefaktu, která následně nepatrně ovlivnila a posunula zbytek modelu.

Tiskárna Photon S (cena okolo 5 000 Kč) jako jediný zástupce technologie DLP měla spíše porovnávací hodnotou proti technologii FDM. Ve většině případů, kromě ceny měla nejhorší výsledky. To je ale dáno skutečností, že tištěné modely na Photon S byl 60% velikosti modelů na FDM. Součástí porovnávání tiskáren pomocí artefaktů je důvod zaplnit celou tiskovou plochu. Kdyby byly modely technologie FDM tisknuty ve stejném měřítku, troufám si tvrdit, že by tiskárna Photon S obsadila lepší pozici.

Tabulka 11 - Technicko-ekonomické vyhodnocení

Kritérium	MK3S+ PLA	MK3S+ PETg	MINI+	Photon S
Doba tisku	3	3	2	1
Kruhová část	1	2	3	4
Polokoule	1	3	2	4

Vlna	2	1	3	4
Válce	1	2	3	4
Sloty	1	2	3	4
Otvory	1	2	3	4
Lattice structure	1	2	3	4
Stavební jehlany (realizovatelnost)	2	3	1	4
Cena	3	3	2	1

11. Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na 3D tisk a jeho technologické a ekonomické možnosti. Především tedy na technologie FDM a DLP.

V první části jsem charakterizoval 3D tisk, ukázal výhody a nevýhody a popsal momentálně nejpoužívanější technologie 3D tisku i s historií. Nadále jsem vypsál základní normu popisující testovací artefakty pro 3D tisk a jejich zkoušení, zmínil jsem i některé další normy související s tématem. Udělal jsem rozbor nejnovějších zkušebních artefaktů, které jsem zmínil v poslední kapitole teoretické části.

V druhé části jsem se v mé práci věnoval návržení a vývoji testovacího artefaktu. Testovací artefakt byl navrhnut ve třech verzích. Tisk byl realizován na třech různých tiskárnách pro technologie FDM a DLP. Pro vyhodnocení bylo použito nedestruktivní zkoušení konkrétně výpočetní tomografie. Měření prvků, které bylo prováděno v jednotlivých řezech artefaktu, je orientační, protože bereme v úvahu chyby měření ovlivněné procesem skenování jako je okolní šum, nebo nečistoty. Po změření všech artefaktů a jejich prvků bylo vše vyhodnoceno do tabulek a okomentováno do jednotlivých kapitolách.

U tiskárny MINI+ jsme mohli pozorovat větší odchylky tvaru a deformace. Po vyhodnocení ale bylo z výsledků ukázáno, že tiskárna MINI+ dokázala vytisknout každý artefakt bez ohledu na dotyk s podložkou. Sice nedosahovala kvality artefaktu z tiskárny MK3s+, ale pro rychlý prototyping je to nejlepší volba z porovnávaných tiskáren. Pokud naším konečným cílem je kvalita tisku, tak MK3S+ je nejlepší volba. Nečekaný rozdíl byl také v porovnání materiálů PLA a PETg u tisku MK3S+, kde se předpokládalo, že PETg jakožto dražší a teplotně více odolný materiál dosáhne lepší výsledků. U technologie DLP a tiskárny Photon S se ukázalo, že 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.

12. Zdroje

- [1] An Additive Manufacturing Test Artifact. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* [online]. 2014, 31 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4487294/>
- [2] J. Richter and P. Jacobs, Accuracy, in: *Rapid Prototyping & Manufacturing*, P. Jacobs, Society of Manufacturing Engineers, (1992) 287-315.
- [3] H.-S. Byun and K. Lee, Design of a New Test Part for Benchmarking the Accuracy and Surface Finish of Rapid Prototyping Processes, *Computational Science and Its Applications — ICCSA 2003*, in: V. Kumar, M. Gavrilova, C. Tan, and P. L'Ecuyer, Springer Berlin / Heidelberg (2003) 989-989.
- [4] D. Scaravetti, P. Dubois, and R. Duchamp, Qualification of rapid prototyping tools: proposition of a procedure and a test part, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (7), 683-690 (2008). 10.1007/s00170-007-1129-2
- [5] 3D tiskárna - jak vlastně funguje a kterou si vybrat. 3dees [online]. Praha: -, 2017 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/blog/3d-tiskarna-jak-vlastne-funguje-a-kerou-si-vybrat>
- [6] Co je to 3D tiskárna a jak funguje. Miroluk [online]. Praha: -, 2018 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.miroluk.cz/clanky-co-je-3d-tiskarna-a-jak-funguje.html>
- [7] FDM vs SLA compare types of 3D printers. Formlabs [online]. -: -, - [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-compare-types-of-3d-printers/>
- [8] What is 3D printing. 3dprinting [online]. -: -, - [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>

- [9] WHAT ARE THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF 3D PRINTING? TWI [online]. Cambridge: -, - [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>
- [10] A. Savini and G. G. Savini, "A short history of 3D printing, a technological revolution just started," 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON), 2015 [cit. 2021-7-29].
- [11] Mastering 3D printing. New York: Apress, 2014. ISBN 978-1-4842-0026-1.
- [12] Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. ChemCatChem [online]. 2018, 14 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cctc.201701619?saml_referrer=
- [13] 3D TISKÁRNA TYPU DELTA. Brno, 2019. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [14] Přehled technologií 3D tisku. DKMP [online]. Ostrava: -, 2018 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [15] Technologické možnosti 3D tisku metodou DLP. Praha, 2021. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [16] Computed Tomography. Radiologyinfo [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.radiologyinfo.org/en/ctscan>
- [17] CIRP Annals - Manufacturing Technology. Elsevier. 2019, (-), 24.
- [18] ISO/TC 261 [online]. Berlin: -, 2011 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.iso.org/committee/629086.html>
- [19] ISO/ASTM 52902:2019(en) [online]. Berlin: -, 2019 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:67287:en>

- [20] ISO/ASTM 52902:2019. Berlin: ISO.ORG, 2019.
- [21] ISO 27547-1:2010 [online]. Berlin: ISO.ORG, 2010 [cit. 2021-7-29].
Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/44222.html?browse=tc>
- [22] ISO 17296-3:2014 [online]. Berlin: ISO.ORG, 2014 [cit. 2021-7-29].
Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/61627.html>
- [23] ISO/ASTM 52900:2015 [online]. Berlin: ISO.ORG, 2015 [cit. 2021-7-29].
Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/69669.html>
- [24] Original Prusa MINI+ a MK3S+. Shop Prusa 3D [online]. Praha: Prusa Research, 2021 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/>
- [25] Anycubic Photon 3D printer. Dentbear [online]. -: Prusa Research, 2021 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.dentbear.com/anycubic-photon-3d-printer.html>

13. Seznam obrázků a tabulek

13.1. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Technologie FDM [14]	16
Obrázek 2 - Technologie SLA [14].....	17
Obrázek 3 - Technologie DLP [14].....	18
Obrázek 4 - Technologie SLS [14].....	19
Obrázek 5 - Technologie LOM [14].....	20
Obrázek 6 - Technologie BJ [14].....	21
Obrázek 7 - Zkušební artefakt používaný firmou Maheshem (rampy, kužely, polokoule, převislé prvky) [1].....	30
Obrázek 8 - Model „uživatelské součásti“ pro vyhodnocení přesnosti v rovině xy [1].....	31
Obrázek 9 - Artefakt (pohled z přední strany).....	33
Obrázek 10 - Artefakt (pohled ze zadní strany).....	34
Obrázek 11 - Tiskárna Original Prusa MINI+ [24].....	37
Obrázek 12 - Artefakt verze 1 od MINI+ (pohled z přední strany).....	38
Obrázek 13 - Artefakt verze 1 pro MINI+ (pohled na stavební jehlany).....	38
Obrázek 14 - Artefakt verze 3 od MINI+ (pohled shora)	39
Obrázek 15 - Tiskárna ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+ [24]	40
Obrázek 16 - Nepovedený výtisk artefaktu verze 1 od MK3S+	40
Obrázek 17 – Nepovedený výtisk artefaktu verze 2 od MK3S+	41
Obrázek 18 - Artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PETg)	41
Obrázek 19 - Artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PLA)	42
Obrázek 20 - Tiskárna Anycubic Photon S [25].....	42
Obrázek 21 - Přilepený artefakt verze 2 od Photon S na dně vany	44
Obrázek 22 - Odtržený artefakt verze 2 od Photon S	44
Obrázek 23 - Artefakt verze 3 od Photon S.....	44
Obrázek 24 - Poskládané artefakty na první CT měření.....	45
Obrázek 25 - Poskládané artefakty na druhé CT měření.....	46
Obrázek 26 - Histogram Isosurface	47

Obrázek 27 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PLA)	48
Obrázek 28 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od MK3S+ (materiál PETg)	48
Obrázek 29 - Analýza odchylek pro artefakt verze 1 od MINI+	48
Obrázek 30 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od MINI+	49
Obrázek 31 - Analýza odchylek pro artefakt verze 3 od Photon S	49
Obrázek 32 – Ukázka měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (analýza kruhové části)	50
Obrázek 33 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (analýza polokoule)	52
Obrázek 34 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (analýza vlny)	53
Obrázek 35 - Vlna pro MK3S+ PLA	53
Obrázek 36 - Vlna pro MK3S+ PETg	54
Obrázek 37 - Vlna pro MINI+ artefakt verze 1	54
Obrázek 38 - Vlna pro MINI+ artefakt verze 3	54
Obrázek 39 - Vlna pro Photon S artefakt verze 3	55
Obrázek 40 - Odchylky měření válců pro artefakt verze 3 od MK3S+ PLA	55
Obrázek 41 - Odchylky měření válců pro artefakt verze 3 od MK3S+ PETg	56
Obrázek 42 - Odchylky měření válců pro artefakt verze 1 od MINI+	56
Obrázek 43 - Odchylky měření válců pro artefakt verze 3 od MINI+	56
Obrázek 44 - Odchylky měření válců pro artefakt verze 3 od Photon S	57
Obrázek 45 - Princip postupného zapisování výsledných hodnot při měření odchylek slotů	58
Obrázek 46 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od MINI+ (měření slotů)	59
Obrázek 47 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od Photon S (měření slotů)	59
Obrázek 48 – Ukázka měření artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA (měření odchylek otvorů)	60
Obrázek 49 - Ukázka měření artefaktu verze 3 od Photon S (měření odchylek otvorů)	60
Obrázek 50 - Lattice structure artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA	62

Obrázek 51 - Lattice structure artefaktu verze 3 od MK3S+ PETG.....	62
Obrázek 52 - Lattice structure artefaktu verze 1 od MINI+	63
Obrázek 53 - Lattice structure artefaktu verze 3 od MINI+	63
Obrázek 54 - Lattice structure artefaktu verze 3 od Photon S	64
Obrázek 55 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od MK3S+ PLA	64
Obrázek 56 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od MK3S+ PETg	65
Obrázek 57 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 1 od MINI+....	65
Obrázek 58 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od MINI+....	66
Obrázek 59 - První vrstva stavebních jehlanů artefaktu verze 3 od Photon S	66

13.2. Seznam tabulek

Tabulka 1 – tři verze zkušebního artefaktu.....	36
Tabulka 2 - Parametry pro tisk Original Prusa MINI+.....	37
Tabulka 3 - Parametry tisku pro ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+	39
Tabulka 4 - Parametry tisku pro Anycubic Photon S.....	42
Tabulka 5 - Parametry měření CT	45
Tabulka 6 - Výsledky měření kruhové části.....	51
Tabulka 7 - Výsledky měření polokoule.....	52
Tabulka 8 - Porovnání zvlněné plochy mezi jednotlivými tiskárnami.....	53
Tabulka 9 - Výsledky měření slotů.....	58
Tabulka 10 - Výsledky měření odchylek otvorů.....	61
Tabulka 11 - Technicko-ekonomické vyhodnocení.....	67