



České vysoké učení technické v Praze

---

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie-Ú12134

**Optimalizace PolyJet technologie 3D tisku**

**PolyJet technology optimization**

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství  
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství  
Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

**Ondřej Bareš**

---

Praha 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	<b>Bareš</b>	Jméno: <b>Ondřej</b>	Osobní číslo: <b>485406</b>
Fakulta/ústav:	<b>Fakulta strojní</b>		
Zadávací katedra/ústav:	<b>Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie</b>		
Studijní program:	<b>Výroba a ekonomika ve strojírenství</b>		
Studijní obor:	<b>Technologie, materiály a ekonomika strojírenství</b>		

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Optimalizace PolyJet technologie 3D tisku**

Název bakalářské práce anglicky:

**Polyjet technology optimization**

Pokyny pro vypracování:

1. Analýza moderních technologií 3D tisku
2. Polyjet technologie - využití, problematika
3. Optimalizace parametrů a ověření funkčnosti

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

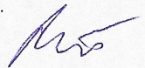
Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

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

 Ing. Jan Šimota 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.

<u>6.4. 2022</u> Datum převzetí zadání	<u></u> Podpis studenta
---	--

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její autor.

V Praze dne: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ondřej Bareš

## **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Janu Šimotovi za odborné vedení a připomínky k tvorbě práce. Dále potom kolegům z ČVUT CIIRC za pomoc a cenné rady při tisku jednotlivých experimentů.



# Abstrakt

Text bakalářské práce popisuje princip aditivních technologií. Zvláště podrobně se věnuje metodám stereolitografie a PolyJet, kde popisuje používané materiály a omezení technologií. Tato práce zkoumá limitní hodnoty pro tisk samonosných úhlů. S těmito naměřenými hodnotami se dále pracuje při návrhu odlehčené struktury. Stěžejní částí textu je popis postupu při tisku analýzy MKP (metodou konečných prvků) pomocí Voxel Print Utility.

## Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, PolyJet, Voxel Print, Samonosné úhly, odlehčená struktura, Rapid Prototyping

## Abstract

Text of this Bachelor thesis describe the principle of additive manufacturing. In particular it devotes in detail to the methods of stereolithography and PolyJet describing the materials and the limitations of the technologies. This work investigates the limit values for printing self supporting angles. These measured values are further used in the design of the lattice structure. The main part of the text is the description of the procedure for printing the FEM (Finite Element Method) analysis using the Voxel Print Utility.

## Keywords

Additive Manufacturing, 3D Printing, PolyJet, Voxel Print, Self supporting angle, Lattice structure, Rapid Prototyping

# Obsah

1	Úvod .....	11
2	Rozdělení tiskáren.....	12
2.1	Tiskárny na kovový tisk .....	12
2.1.1	Práškové .....	12
2.1.2	Drátové.....	13
2.2	Tiskárny na plast .....	15
2.2.1	Práškové .....	15
2.2.2	FDM.....	16
3	SLA.....	17
3.1	Princip SLA.....	17
3.1.1	Free surface approach .....	18
3.1.2	Constrained surface approach .....	18
3.2	Materiály používané ve stereolitografii.....	18
4	PolyJet.....	21
4.1	Princip tisku.....	21
4.2	Drsnost povrchu .....	23
4.3	Optimalizace tvarů k tisku.....	24
5	Materiály.....	26
5.1	Vero materiály .....	26

5.2	Flexibilní materiály .....	28
5.2.1	Tango .....	28
5.2.2	Agilus 30 .....	30
5.3	Míchání materiálů.....	31
6	Software.....	32
6.1	GrabCAD Print.....	32
6.2	Voxel Print .....	32
7	Využití .....	33
8	Omezení technologie .....	34
9	Návrh experimentu .....	35
10	Stratasys J750.....	36
11	Samonosné úhly .....	38
11.1	Motivace experimentu .....	38
11.2	Specifikace experimentu.....	38
11.3	Výsledek Experimentu.....	40
12	Lattice struktura .....	41
12.1	Návrh Lattice struktury.....	41
12.2	Výsledek experimentu .....	42
13	Tekuté podpory .....	44
13.1	Návrh experimentu .....	44
13.2	Výsledek experimentu .....	45

14	Tisk analýzy MKP .....	47
14.1	Tvorba digitálního modelu .....	47
14.2	Tvorba PNG snímků .....	48
14.3	Tvorba programu .....	49
14.3.1	Nahrání vstupních dat.....	49
14.3.2	Převod všech barev pouze na množinu definovaných barev.....	50
14.3.3	Změna vnitřních bílých pixelů na jinou barvu .....	52
14.3.4	Změna všech černých pixelů na jinou barvu .....	53
14.3.5	Zdvojení pixelů v ose X .....	54
14.3.6	Vytvoření souboru zip z uložených složek.....	55
14.3.7	Stažení zkonvertovaných dat.....	55
14.4	Tvorba GCVF souboru .....	56
14.5	Výsledek Experimentu.....	58
14.6	Výhled.....	59
15	Závěr .....	60
16	Bibliografie .....	61

# Seznam zkratk

3D	Trojdimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
BPE	Bound Powder Extrusion
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
DLP	Digital Light Projection
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DPI	Dots per Inch
EBM	Electron Beam Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Element Method
FFF	Fused Filament Fabrication
GVCF	Genomic Variant Call Format
MJF	Multi Jet Fusion
MKP	Metoda konečných prvků
PIL	Python Imaging Library
PNG	Portable Network Graphics
PolyJet	Polymerové tryskání
RTV	Room Temperature Vulcanization
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
UV	Ultrafialové záření
VTU	Visualization Toolkit for Unstructured Grids

WAAM

Wire and Arc Additive Manufacturing

# 1 Úvod

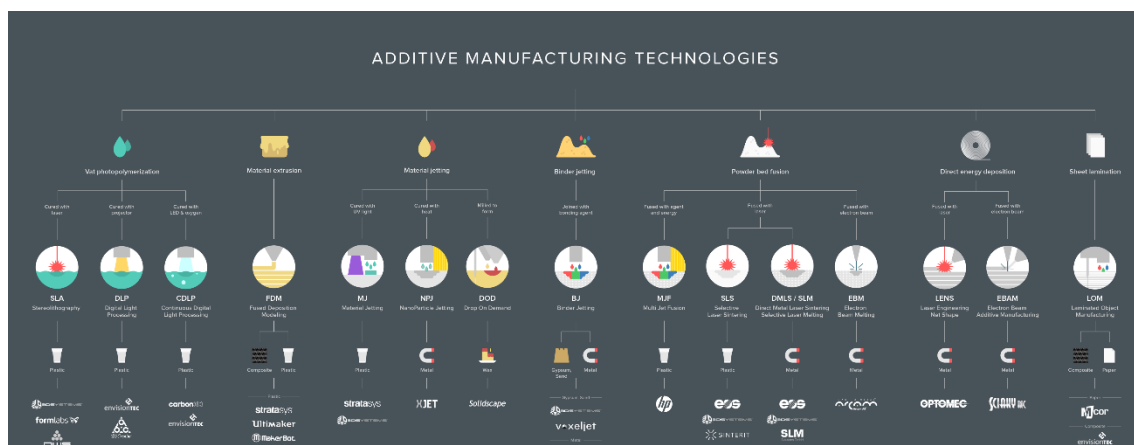
Spolu s tlakem na rychlou výrobu prototypů a vizualizací, kdy musí vývojáři rozhodovat o výsledném vzhledu produktu, roste poptávka po aditivních technologiích. Prototypy jsou takto vytvořeny rychle, přesně a v porovnání s konvenčními metodami i levně.

Jelikož je PolyJet technologie, která vyniká v rychlé a plnobarevné vizualizaci prototypů, tak je úkolem této bakalářské práce nalezení postupu pro tisk analýzy metodou konečných prvků, při zachování barevnosti a průsvitnosti modelu.

Tato práce popisuje především technologii PolyJet, která patří mezi přední představitele rapid prototyping. Práce se věnuje principu technologie, jejím výhodám a omezením. Cílem práce je za pomoci nových funkcí obsažených ve výzkumném balíčku zjistit maximální samonosné úhly a porovnat naměřené údaje s údaji, které byly naměřeny dříve na jiné tiskárně. Dále prozkoumat využití tekutých podpor a popsat omezení, které při použití těchto podpor nastane.

## 2 Rozdělení tiskáren

Tiskárny dělíme nejčastěji podle tištěného materiálu, tedy na kovové a nekovové. Následně dle použité technologie dle obrázku č. 1. Toto dělení je blíže představeno na následujících stránkách.



Obrázek 1 Rozdělení tiskáren [1]

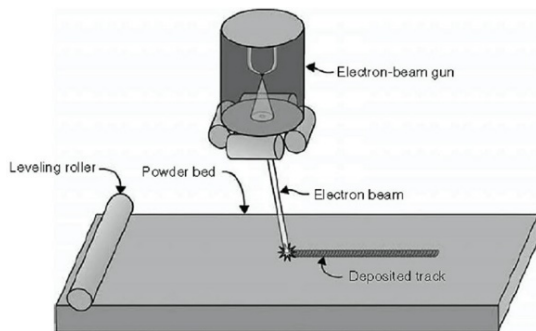
### 2.1 Tiskárny na kovový tisk

#### 2.1.1 Práškové

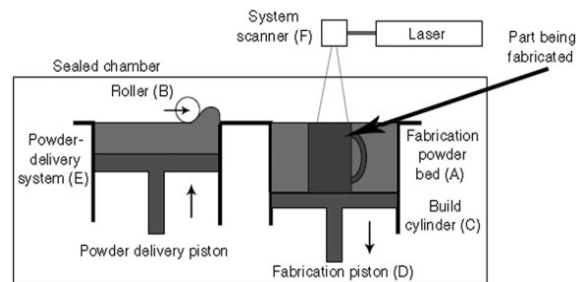
Většina kovového 3D tisku pracuje s kovovými prášky, a proto jsou největší rozdíly v technologiích ve způsobu spékání prášku. Mezi tyto technologie patří EBM (Electron Beam Melting), kde se k tavení prášku používá elektronový svazek. Výhodou této technologie je, že je oproti jiným metodám spékání rychlá, avšak není tak přesná a zároveň musí být tištěná v komoře vakuum. [2]



Na velmi podobném principu funguje další nejpoužívanější technologie – DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Princip tisku je u DMLS stejný jako u EBM, tedy pomocí zdroje energie se taví kovový prášek, nicméně zde se jako zdroj tepla používá laser. Tento princip je ukázán na obrázku 2 a 3. Zároveň v komoře není vakuum ale inertní plyn. Nejčastěji dusík nebo argon, podle tištěného materiálu. Tato technologie je velmi přesná, avšak oproti EBM pomalejší. [2]



Obrázek 2 Schéma technologie DMLS [2]



Obrázek 3 Schéma technologie DMLS [2]

## 2.1.2 Drátové

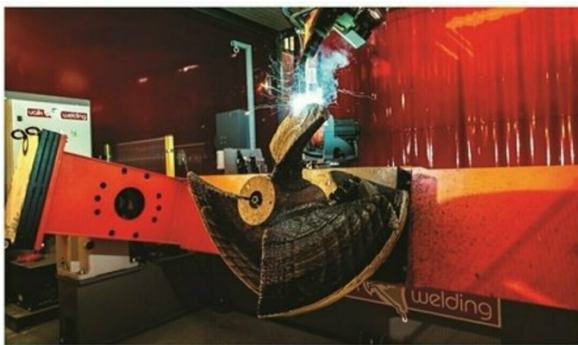
Další způsob, jakým lze tisknout kovový materiál je tisk z kovových drátů. Mezi tyto technologie patří BPE (Bound Powder Extrusion) a WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing).

Bound Powder Extrusion patří mezi jedny z nejnovějších technologií tisku. Funguje na stejném principu jako plastový tisk technologií Fused Deposition Modeling (FDM), tedy na principu extruze filamentu z trysky. Kov je při této metodě ve filamentu sice ve formě prášku, nicméně je pojen polymerem, který se po tištění chemicky odstraní a vytištěný díl se následně v peci speče. Ukázka tiskárny, která tiskne technologií BPE je na obrázku č. 4. [3; 4]



Obrázek 4 Tiskárna pro technologii BPE [4]

Wire and Arc Additive Manufacturing je v mnoha ohledech velice podobné klasickému svařování. Robotické rameno postupně nanáší jednotlivé návarové housenky na sebe, jak je ukázáno na obrázcích 5 a 6. Jako materiál se používá běžný svařovací drát. Díly vytištěné touto metodou nejsou moc přesné, a proto se velice často po vytištění ještě obrábí. Na druhou stranu se jedná o zdaleka nejrychlejší metodu tisku. Největší uplatnění má v oblasti letectví. [5]



Obrázek 5 Technologie WAAM [5]



Obrázek 6 Technologie WAAM [5]

## 2.2 Tiskárny na plast

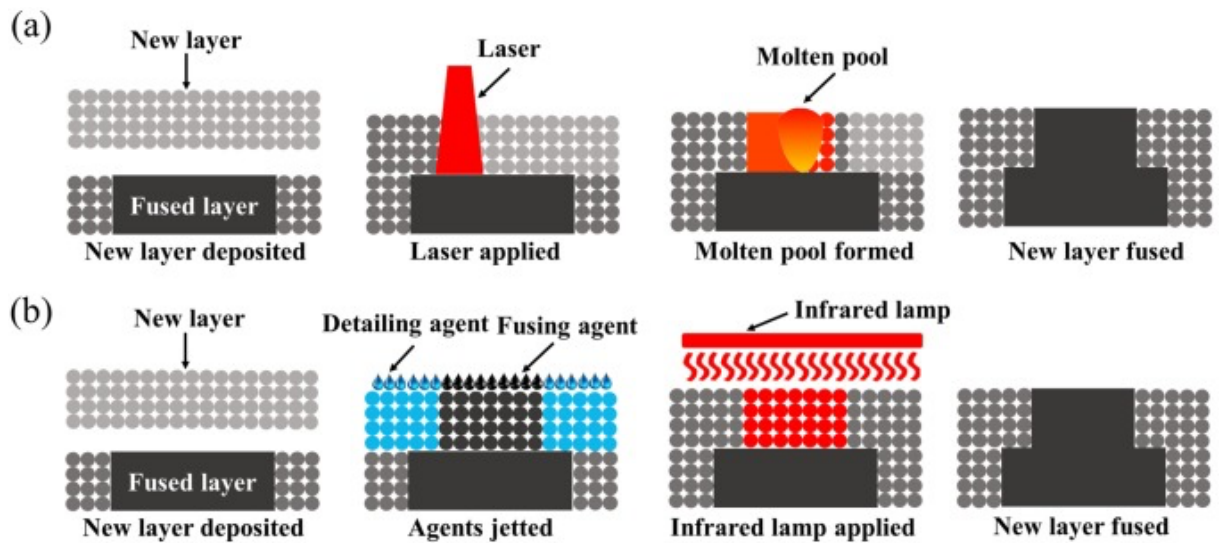
Stejně jako kovové tiskárny i tiskárny na plast dělíme nejčastěji podle typu tištěného materiálu, tedy na tiskárny práškové, materiálové extruze a tištění z tekutých fotopolymerů.

### 2.2.1 Práškové

Princip fungování této tiskárny je stejný jako u DMLS, tedy spékání prášku pomocí CO<sub>2</sub> laseru do požadovaného tvaru. Spékání prášku probíhá v inertní atmosféře dusíku nebo argonu. Nespečený materiál lze znovu použít, a tím se sníží náklady na výrobu. Velkou výhodou této technologie zároveň je, že nespečený prášek kolem dílu slouží jako podpora, a tak se může tato technologie využít na díly volné geometrie, aniž bychom brali v úvahu tisknutí podpor. Problém nastává, když chceme využít odlehčených struktur uvnitř dílce. Takový tisk není možný, protože bychom nedostali nespečený prášek pryč, a tak je potřeba díly tištěné metodou SLS (Selective Laser Sintering) optimalizovat. [6; 7]

MJF (Multi Jet Fusion) je poměrně mladá technologie od firmy Hewlett-Packard Inc. Patří také mezi technologie Powder Bed Fusion, ale oproti SLS používá jako zdroj tepla soustavu infračervených lamp ke spečení prášku, na který byl nanesen fusing agent, což je černá sloučenina, která absorbuje infračervené záření. Kolem dílu se také nanáší takzvaný detailing agent, což je sloučenina, která je velice podobná barvám v klasické inkoustové tiskárně. Tištěným dílům dodává barvu. Celý proces je přiblížen na obrázku č. 7. Na jedné tiskárně lze střídát více materiálů, avšak na následný postprocessing je potřeba samostatný přístroj, aby nedošlo k míchání materiálů. Přebytečný materiál se po

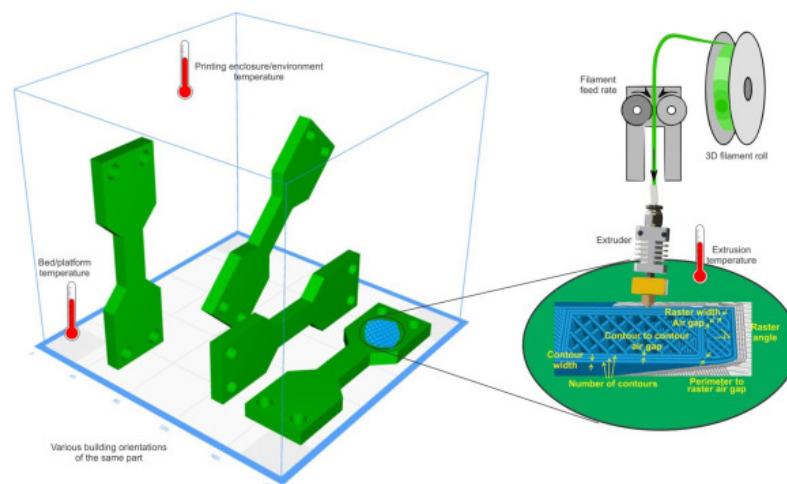
postprocessingu může následně recyklovat, a to až z 80-85 % oproti technologii SLS, kde se recykluje kolem 50 % prášku. [6; 8]



Obrázek 7 Schéma technologie MJF [6]

## 2.2.2 FDM

Fused Deposition Modeling – FDM je známé také jako Fused Filament Fabrication – FFF. Jedná se o technologii, při níž je materiál v podobě filamentu extrudován z trysky. Díl se tiskne postupně po vrstvách tak, že se trysková hlava pohybuje v osách X a Y a po dokončení jedné celé vrstvy se posune v ose Z o výšku vrstvy. Schéma této technologie je přibliženo na obrázku č. 8. [9; 10]



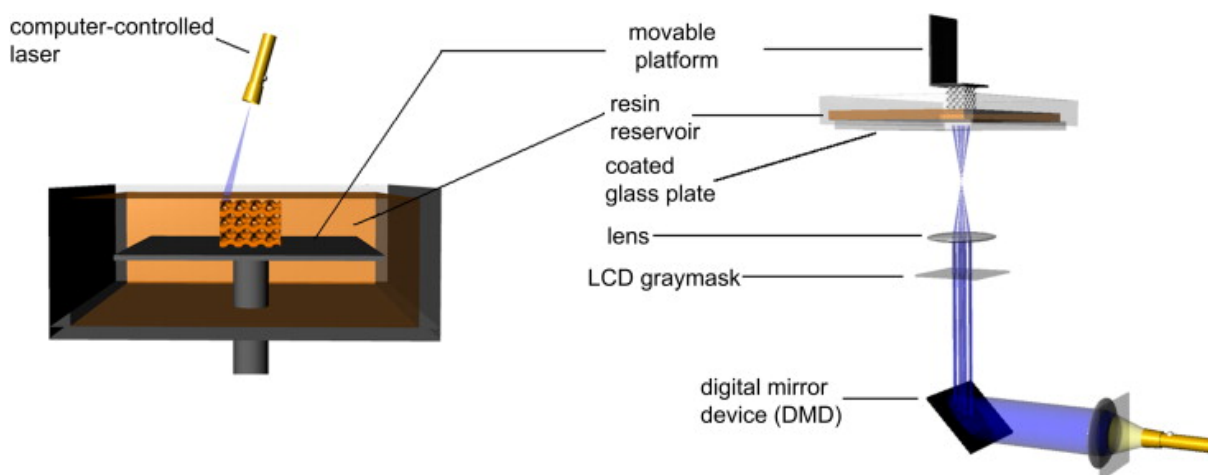
Obrázek 8 Schéma technologie FDM [9]

## 3 SLA

Nejstarším procesem aditivních technologií je stereolitografie – SLA. Tato technologie byla vyvinuta Hideo Kodomou v roce 1981 jakožto levná metoda k vizualizaci modelů ve 3D. První komerční tiskárna byla patentována Charlesem W. Hullem v roce 1986. Během vývoje různých procesů překonala stereolitografie původní myšlenku pouhé vizualizace dílů a začala se tisknout velice komplexní geometrie. Postupem času není použitý materiál limitován pouze na polymery a dají se tisknout i kovové nebo keramické materiály, které jsou ale opět ve formě fotonopolymery. [11]

### 3.1 Princip SLA

Výroba dílů stereolitografií spočívá ve vytvrzování jednotlivých vrstev pryskyřice, která je v nádobce opakovaně vystavována ultrafialovému záření. Fotoiniciátor v pryskyřici zareaguje na světelné ozáření a dojde k polymerizaci v tomto místě. Po ozáření dojde k nanesení další vrstvy a ozáření. U metody SLA se k ozařování používá počítačem řízený laserový paprsek. Existuje ještě alternativní technologie DLP (Digital Light Projection), při které se promítají jednotlivé pixely vrstvy pomocí projektoru. Tyto technologie jsou ukázány na obrázku č. 9. [11]



Obrázek 9 Schéma technologie SLA a DLP [11]

Potřebné světlo pro fotonopolymizaci může být přivedeno dvěma způsoby. Buď zespodu skrze průhlednou nádrž v tzv. omezeném povrchovém přístupu – constrained

surface approach, nebo shora v tzv. volném povrchovém přístupu – free surface approach. [11]

### **3.1.1 Free surface approach**

Free surface approach spočívá v tištění na tiskovou platformu, která následně sjíždí do nádoby. K ozáření vrstvy dochází shora a následně se celá platforma ponoří o výšku vrstvy, a tím je nanesena nová vrstva. Toto může být doplněno o mechanický prvek, který rovnoměrně roznese vrstvu pryskyřice. Nevýhodou je ovšem spotřeba materiálu, kterého musí být v nádržce více, a to především u vysokých dílů nehledě na celkový vytištěný objem. [11; 12]

### **3.1.2 Constrained surface approach**

Constrained surface approach spočívá v tištění na platformu, která je zavěšena nad nádržku s fotopolymerem. Záření prochází průhledným dnem nádržky a vytvrzuje vrstvu polymeru na hladině nádržky. Po ozáření vyjede platforma o definovanou vzdálenost v ose Z a celý proces probíhá znovu. Tímto způsobem vyrůstá díl z nádržky. Výhodou této metody je, že je potřeba méně materiálu k tištění, jelikož se do něj díl nezanořuje. Nevýhodou ovšem je, že při každé nové vrstvě je potřeba překonat síly mezi tekutým, a právě vytvrzeným polymerem. To může vést k odtržení dílu od platformy, pokud s ní nebude v kontaktu na dostatečné ploše. [11; 12]

V současné době se preferuje druhý způsob, tedy ozařování zdola. Především protože se dá určit výška vrstvy s přesností až 0,1 – 1 mikrometr. Zároveň je povrch hladší a není potřeba mechanického rozhrnování. [11]

## **3.2 Materiály používané ve stereolitografii**

Jako materiály pro SLA se využívají fotopolymery, tedy polymery, které reagují na světlo. Můžeme se také setkat s označením resiny či pryskyřice. Materiály mají stejné základní složení, tedy prekurzory v podobě monomerů a oligomerů. Dále potom fotoiniciátory, které se při vystavení světlu dělí na dvě nebo více částí a reagují s monomery nebo oligomery, které váže dohromady. Součástí jsou ještě pojiva a absorbéry. [11]

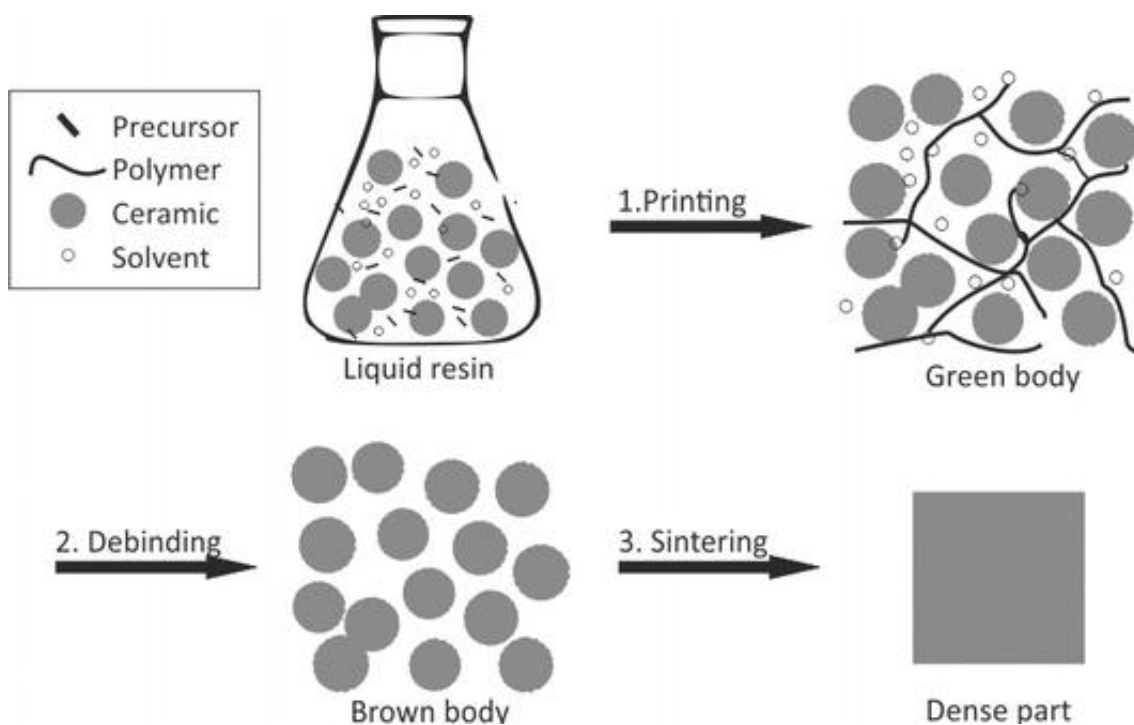
Prekurzory jsou v tomto případě tekuté molekuly, které mohou být polymerizovány po vystavení světlu, čímž vytvoří prostorový objekt. [11; 12]

Můžeme se setkat především se dvěma druhy materiálů, s akryláty a epoxidy. Pryskyřice založené na akrylátech jsou historicky starším materiálem, který má výhodu především ve své velké reaktivnosti a tím je možné tisknout rychleji. Jejich nevýhodou je poté vysoká smrštitivost při tištění, což vede k horší kvalitě výtisků. Řešení tohoto problému se našlo kombinací akrylátů a methakrylátů. [11]

Materiály založené na epoxidech mají jiný vytvrzovací proces nežli materiály akrylátové a vyžadují delší čas tvrdnutí. Na rozdíl od akrylátů na ně nemá vliv kyslík, ale jsou náchylnější na vlhkost. Mají malou smrštitivost, a tím pádem i větší přesnost výtisků. [11; 12]

Aby se využilo výhod obou druhů, vyvinuly se materiály, které jsou kombinací akrylátů a epoxidů. Tyto materiály tak mají malou smrštitivost a relativně rychlý čas vytvrzení. Proto jsou nyní standardem v komerčním užívání. [11; 12]

V materiálech se často vyskytují výplně ve formě prášku ať už keramické nebo kovové. Takovéto materiály se začaly využívat především pro funkční díly, u kterých je kladen větší důraz na mechanické vlastnosti. Prášku může být v pryskyřici až 57 %. Většinou u těchto materiálů slouží pryskyřice pouze jako pojivo a po vytištění se chemicky odstraní. Následně se keramický nebo kovový prášek speče, aby vytvořil funkční díl. Celý proces výroby takových dílů je zobrazen na obrázku č. 10. Pro to, abychom získali geometricky přesné díly, je potřeba při navrhování počítat se specifickou smrštitivostí daného materiálu a přizpůsobit tomu samotný tisk. [11; 12]



Obrázek 10 Schéma tisku keramických dílů [12]

Pro co nejlepší přesnost tisku je požadováno vysoké procento výplně, nicméně se tomu musí přizpůsobit výška vrstvy. Samotná velikost práškového materiálu musí být menší, než je výška vrstvy, aby byl tisk kvalitní. [12]

Při dlouhém času tisku nebo při přidání vysokého procenta keramiky či kovu se můžou vlastnosti fotopolymeru změnit tak, až z něj bude tisk takřka nemožný. Proto se do něj přidávají různá aditiva, především na snížení viskozity, což ovlivní nanášecí mechanismus, nebo látky, které zajistí dobré vlastnosti resinu po celou dobu tisku. Na toto se používají organické kyseliny s dlouhým řetězcem, jako je třeba kyselina olejová. [12]

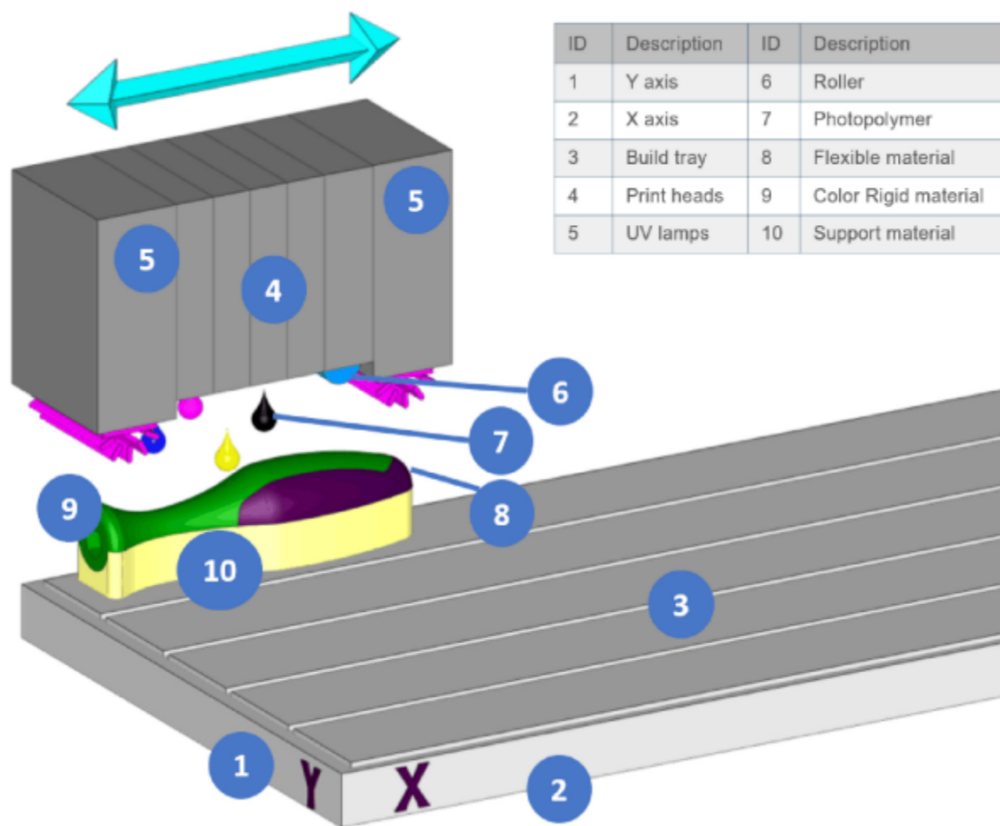


## 4 PolyJet

Celá technologie SLA je velice přesná a efektivní při tisku fotopolymerů, avšak má jednu velkou nevýhodu – nelze s ní tisknout více materiálů najednou. Toto omezení technologie je znát především při designování pohyblivých mechanismů, vytváření modelů tkání či přímo funkčních implantátů. Proto přišla v roce 2012 firma Objet Geometries Ltd. s první vícemateriálovou tiskárnou. Zároveň v daném roce koupila tuto společnost největší firma v oblasti 3D tiskáren, společnost Stratasys. Stratasys nyní drží patent na technologii PolyJet a je jedinou firmou, která jej vyrábí. PolyJet je jedinou komerčně dostupnou technologií 3D tisku, která je schopna vytvářet materiálové složení dílu dle potřeby. Tohoto je docíleno pomocí nanášení jednotlivých kapiček fotopolymerů, které se chovají jako polypropylenové materiály či jako pryž. Kapičky jsou následně uhlazeny a vytvrzeny UV světlem. Tento proces vede k tomu, že můžeme vytvořit součásti, které mohou být na jedné straně pevné a na druhé flexibilní, a zároveň přechody mezi nimi. [13]

### 4.1 Princip tisku

PolyJet patří mezi material jetting tiskárny. Jedná se o technologii 3D tisku, při které jsou nanášeny jednotlivé kapičky fotopolymeru dle požadavků přímo na stavební platformu viz obrázek 11. [14]



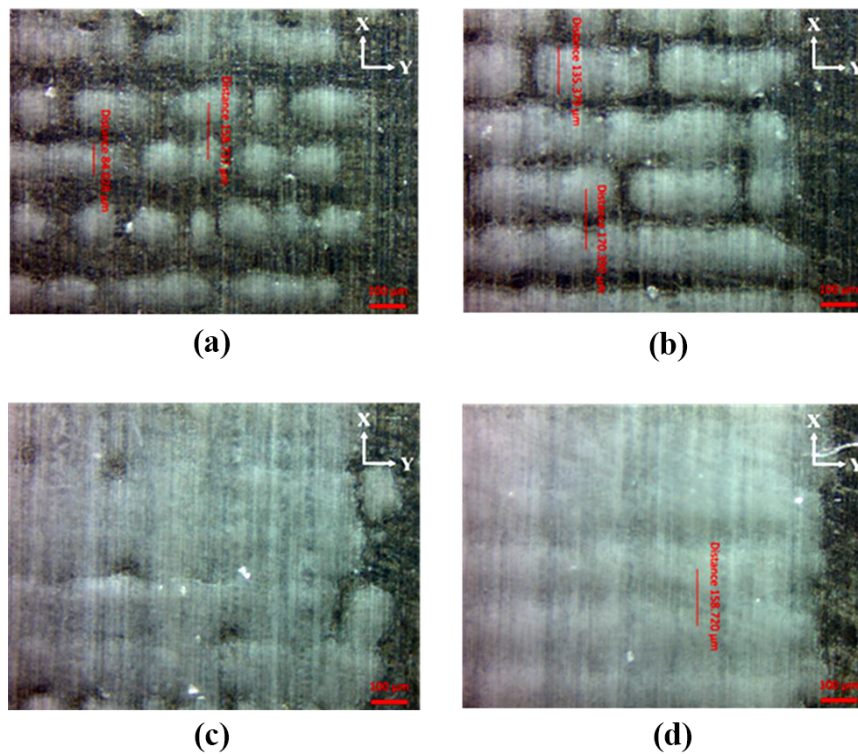
Obrázek 11 Popis PolyJet technologie [14]

Poté, co se na nanese vrstva kapiček fotopolymeru tiskovou hlavou a rozhrnovací válec vyrovná a uhladí vrstvu, pak pár UV světel vrstvu několikrát přejede a tím ji vytvrdí. Jelikož má PolyJet několik tiskových hlav, je možné na jedné vrstvě tisknout více materiálů zároveň. Jeden z materiálů, který vždy zabírá jeden slot, je hydrofobní gel, který slouží jako podpůrný materiál, jenž je po vytištění odstraněn. Zbylé sloty, kterých je na tiskárnách různý počet podle třídy tiskárny, jsou osazeny stavebními materiály, které mohou být buď flexibilní nebo pevné. [14]

Velikost jedné kapičky je v průměru 80  $\mu\text{m}$  a jedna vrstva se nanáší čtyřmi přejezdy tiskové hlavy. Stav, v jakém je tištěná vrstva po jednotlivých přejezdech je ukázán na obrázku č. 12. [15]

Rozlišení kapiček ve směru osy Y je dáno počtem trysek v tiskové hlavě tiskárny. V tomto směru má tiskárna rozlišení 300 DPI. [16]

Ve směru osy X má tiskárna rozlišení 600 DPI, jelikož vzdálenost mezi dvěma kapičkami není fixně dána vzdáleností trysek, ale i posunem tiskové hlavy. [15; 16]

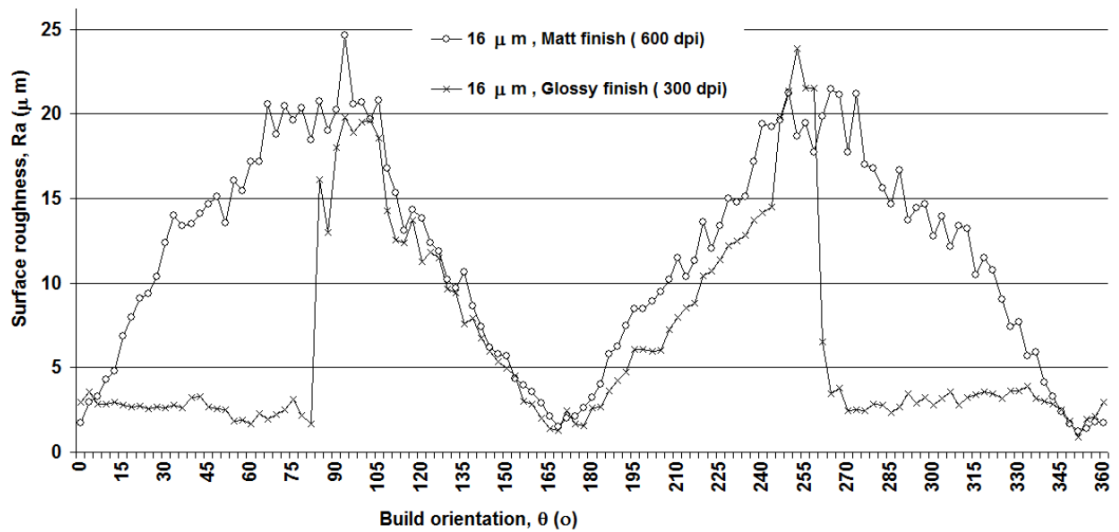


**Notes:** (a) After 1st round of jetting (b) after 2nd round of jetting; (c) after 3rd round of jetting; (d) after 4th round of jetting

Obrázek 12 Vrstvy po přejezdu tiskové hlavy [15]

## 4.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu u této technologie závisí na mnoha faktorech, a i při zachování stejných parametrů tiskárny se může razantně měnit. Jak uvádí Kumar v práci *A study on surface roughness of rapid prototypes fabricated using PolyJet 3D printing systém*. Drsnost se odvíjí od tištěného povrchu, zda je matný nebo lesklý, a také od úhlu tištěné plochy. Naměřené hodnoty jsou na obrázku č. 13. [17]



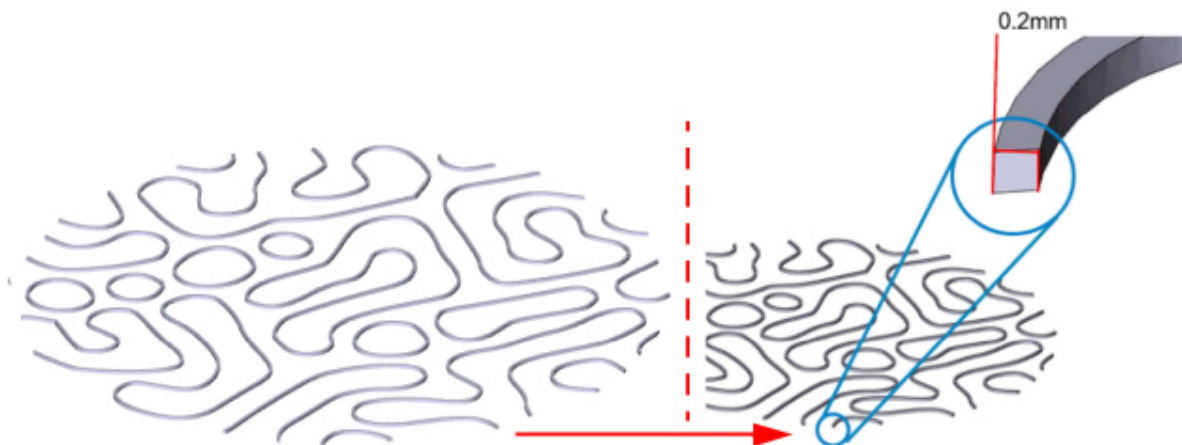
Obrázek 13 Drsnost povrchu v závislosti na orientaci [17]

Můžeme tedy konstatovat, že pokud tiskneme s nastavením tiskárny na lesklý povrch, docílíme drsnosti Ra 3,2 ve všech úhlech tisknutelných bez podpor. Pokud ale tiskneme s nastavením tiskárny na matný povrch, je drsnost součásti velice proměnlivá a závislá na úhlu povrchu. [17]

### 4.3 Optimalizace tvarů k tisku

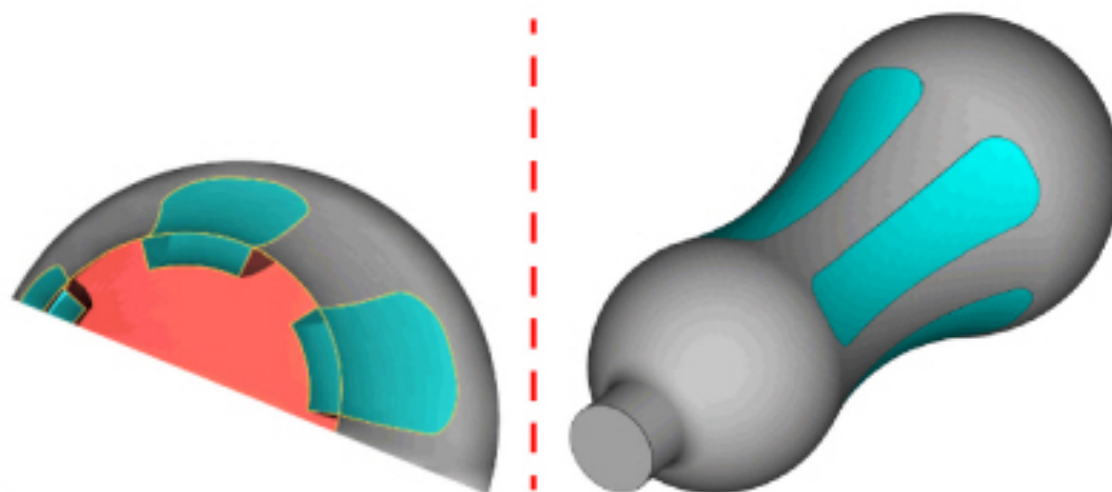
Jako každá technologie, má PolyJet svá určitá omezení. Pokud tiskneme tenké stěny, které ale nenesou žádnou zátěž, měla by mít stěna minimální tloušťku 0,6 mm. Pokud je pak stěna vyšší než 3 centimetry, měl by být povrch matný, jelikož matnosti povrchu se docílí nanesením tenké vrstvy podpurného materiálu, který stěnu podpoří. Je-li stěna zatížena, neměla by být tenčí než 1 mm. [14]

Při tištění detailních vzorů jsou hrany přesné a ostré od průřezu 0,2 mm, jak je uvedeno na obrázku č 14.



Obrázek 14 Tolerance pro jemné detaily [14]

Pokud je u modelu vyžadováno více materiálů, musíme na to myslet již při modelování součástí a pro dva různé materiály mít dvě různá těla. Viz obrázek č 15.



Obrázek 15 Model s více těly [14]

## 5 Materiály

Možnosti materiálů jsou velmi důležitým faktorem při navrhování součástí pro 3D tisk. Technologie PolyJet využívá stejných materiálů jako technologie SLA – tedy fotopolymerů, nicméně společnost Stratasys pro ni vyvíjí řadu nových materiálů, které mají využití pouze u technologie PolyJet. Materiály sahají od pevných materiálů po flexibilní a od neprůhledných po transparentní. V tomto rozpětí nalezneme materiály, které mají srovnatelné vlastnosti s termoplasty. Jsou pevné a odolné proti vyšším teplotám. Zároveň můžeme tisknout materiály, které jsou svými vlastnostmi podobné lidské tkáni a jsou biokompatibilní. [18]

Portfolio materiálů v současné době čítá 29 základních materiálů. Co ale dělá technologii PolyJet skutečně jedinečnou, je možnost míchání materiálů, a to buď tak, že části jednoho modelu jsou tvořeny jinými materiály, tzv. multimaterial 3D printing, anebo mícháním jednotlivých materiálů k dosažení hybridních vlastností a barev. V souvislosti s tím hovoříme o digitálních materiálech. [18]

### 5.1 Vero materiály

Materiály ze skupiny Vero patří mezi pevné materiály, které můžeme pomocí technologie PolyJet tisknout. Jsou to víceúčelové materiály, které nachází největší uplatnění ve tvorbě vizuálních modelů, funkčních prototypů či ve výrobě RVT forem. [18; 19]

Vero materiály jsou dostupné v sedmi různých barevných odstínech. V modré, bílé, černé, šedé, azurové, purpurové a žluté. Všechny tyto barvy mají velice podobné mechanické a termální vlastnosti. Výrobce je udává dle tabulky 1. Na tiskárně Stratasys J750 je můžeme tisknout v nejnižší vrstvě 14  $\mu\text{m}$ . [19]

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti udávané výrobcem [19]

<b>Mechanická vlastnost</b>	<b>Způsob testování</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Pevnost v tahu</b>	D-638-03	50-65 MPa
<b>Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení</b>	D-638-05	10-25 %
<b>Modul pružnosti</b>	D-638-04	2000-3000 MPa
<b>Pevnost v ohybu</b>	D-790-03	75-110 MPa
<b>Modul pružnosti v ohybu</b>	D-790-04	2200-3200 MPa
<b>Absorpce vody</b>	D-570-98 24hr	1,1-1,5 %
<b>Tvrдость podle Rockwella</b>	Scale D	73-76 HRC

Tyto hodnoty ověřili N. Senniangiri, R. Girimurugan a M. Vairavel v publikaci *Exploring the mechanical properties of the polyjet printed verowhite specimen*, ve které naměřili hodnoty pro materiál VeroWhite dle tabulky 2. [20]

Tabulka 2 Naměřené hodnoty [20]

<b>Mechanická vlastnost</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Pevnost v tahu</b>	58,6-65,2 MPa
<b>Pevnost v ohybu</b>	86,65 MPa
<b>Modul pružnosti v ohybu</b>	2145 MPa
<b>Tvrдость podle Rockwella</b>	70,7 HRC

Dle naměřených údajů můžeme konstatovat, že hodnoty udávané výrobcem jsou přesné a vypovídající. Zároveň dosáhneme lepších parametrů při tisku s lesklým povrchem a s nastavením tiskárny na high quality mode. [20]

## **5.2 Flexibilní materiály**

### **5.2.1 Tango**

Materiály ze skupiny Tango jsou flexibilní materiály, které simulují chování pryže. Používají se na povrchy, které mají být na dotek měkké, na protiskluzové povrchy, podrážky bot a na další aplikace, které vyžadují flexibilní materiál. Materiály ze skupiny Tango jsou dostupné v černé barvě jako TangoBlack nebo TangoBlackPlus, dále v šedé barvě jako TangoGray a také v průsvitné barvě jako TangoPlus. Na tiskárně Stratasys J750 lze docílit nejnižší výšky vrstvy 14  $\mu\text{m}$ . [21]

Mechanické vlastnosti jsou uvedené v tabulce č. 3 a 4



Tabulka 3 Mechanické vlastnosti pro TangoBlackPlus FLX980 a TangoPlus FLX930 [21]

<b>Mechanická vlastnost</b>	<b>Způsob testování</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Pevnost v tahu</b>	D-412	0,8-1,5 MPa
<b>Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení</b>	D-412	170-220 %
<b>Sada komprese</b>	D-395	4-5 %
<b>Tvrдость podle Shora</b>	D-2240	26-28 Shore A
<b>Polymerizovaná hustota</b>	D-792	1,12-1,13 g/cm <sup>3</sup>

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti pro TangoBlack FLX973 [21]

<b>Mechanická vlastnost</b>	<b>Způsob testování</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Pevnost v tahu</b>	D-412	1,8-2,4 MPa
<b>Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení</b>	D-412	45-55 %
<b>Sada komprese</b>	D-395	0.5-1.5 %
<b>Tvrдость podle Shora</b>	D-2240	60-62 Shore A
<b>Polymerizovaná hustota</b>	D-792	1,14-1,15 g/cm <sup>3</sup>

## 5.2.2 Agilus 30

Materiály skupiny Agilus 30 jsou fotopolymery s vlastnostmi podobnými pryži. Využívají se především pro ověření pokročilých návrhů, kde je potřeba znát kromě tvaru i další fyzikální vlastnosti modelu. Dále se používají k tisku plnobarevných prototypů, které vydrží opakované ohýbání. Číslo 30 v názvu materiálu značí to, že všechny materiály z této skupiny mají Tvrdost podle Shora – 30 Shore A. Mechanické vlastnosti jsou uvedené v tabulce č. 5. Na tiskárně Stratasys J750 lze dosáhnout nejnižší výšky vrstvy 27  $\mu\text{m}$ . [22]

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti Agilus 30 materiálů [22]

Mechanická vlastnost	Způsob testování	Černá/Průsvitná	Bílá	Azurová, Purpurová, Žlutá
<b>Pevnost v tahu</b>	D-412	2,4–3,1 MPa	2.1-2.6 MPa	2,2–2,6MPa
<b>Jmenovité poměrné</b>	D-412	220–270 %	185–230 %	315–335 %
<b>Prodloužení při přetržení</b>	D-412	220–270 %	185–230 %	315-335 %
<b>Sada komprese</b>	D-395	6–7 %	6–7 %	6–7 %
<b>Tvrdost podle Shora</b>	D-2240	30–35 Shore A	30–40 Shore A	28-33 Shore A
<b>Polymerizovaná hustota</b>	D-792	1,14–1,15 g/cm <sup>3</sup>	1,14–1,15 g/cm <sup>3</sup>	1,14–1,15 g/cm <sup>3</sup>

### 5.3 Míchání materiálů

Technologie PolyJet jako jediná z technologií dokáže tisknout takzvané digitální materiály. Digitální materiály jsou kompozity tvořené souvislým tiskem až sedmi materiálů najednou. Na výběr je poté všech 29 základních materiálů. Mícháním materiálů docílíme širokého spektra vlastností a barev. Při standardní aplikaci digitálních materiálů můžeme přiřadit jednomu tělu jeden digitální materiál, který je tvořen dvěma materiály, které jsou dostupné v tiskárně a jsou vzájemně namíchané v jedné ze sedmi možných kombinací. [18; 23; 24]

Pomocí digitálních materiálů jsme schopni dosáhnout materiálů, které mají velmi podobné vlastnosti jako termoplasty, a získat tím prototypy z fotopolymerů, které mají stejné vlastnosti. Mezi hlavní představitele těchto materiálů patří digitální akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Digitální ABS se velice těsně přibližuje mechanickým vlastnostem ABS. V porovnání s průměrnými hodnotami pro ABS má stejnou pevnost, ohebnost, odolnost a tepelnou odolnost. Jeho odolnost vůči nárazu je o něco horší, než je průměr pro ABS, ale je stále v rozsahu různých typů ABS. [18; 24]

Mícháním materiálů nemusíme mít za cíl pouze změnu fyzikálních vlastností materiálů, ale například dosažení konkrétní barvy. K tomu slouží PANTONE zabudované přímo do software Grab CAD. Díky tomu máme možnost tisknout barevně přesné modely. Na výběr je zde z 1970 tisknutelných barev. [24; 25]

# 6 Software

## 6.1 GrabCAD Print

Všechny úkony, které je potřeba s modelem udělat pro to, aby se vytiskl, se dělají přes software GrabCAD Print. V tomto softwaru si můžeme nastavit polohu modelu na podložce, přiřadit materiály jednotlivým tělům a zároveň i software zkontroluje, jestli není v modelu nějaká chyba. [26]

Program nicméně slouží i k celkovému ovládání tiskárny, tedy k nastavení materiálů, které máme přímo v tiskárně. K řízení sledu jednotlivých výtisků nebo zjišťování detailních informací o tiskárně. Pomocí tohoto jednoho softwaru lze také řídit několik různých tiskáren zároveň a připravovat modely jak například pro PolyJet, tak pro technologii FDM. [26]

## 6.2 Voxel Print

Voxel Print Utility je doplněk pro GrabCAD, který umožňuje definovat materiál každého voxelu. V běžném procesu řešíme barvy a materiály pouze přiřazením celému tělu modelu, případně můžeme přidat texturu na povrch modelu. Voxel Print umožňuje tisknout díly s komplexím rozložením materiálů, gradientů nebo jiných vzorců. [16; 27]

Příprava modelu probíhá tak, že nejprve vytvoříme PNG snímky, které obsahují maximálně 6 barev. Počet snímků pak volíme podle výšky modelu a výšky vrstvy, kterou bude tiskárna tisknout – pro Stratasys J750 v módu High Mix, na který se obvykle tiskne, je výška vrstvy 0,027 mm. Po vytvoření snímků přiřadíme jednotlivým barvám pomocí Voxel Print materiály. Software vygeneruje GVCF soubor, se kterým již není potřeba nic dalšího dělat a je připraven k tisku. [16; 27]

## 7 Využití

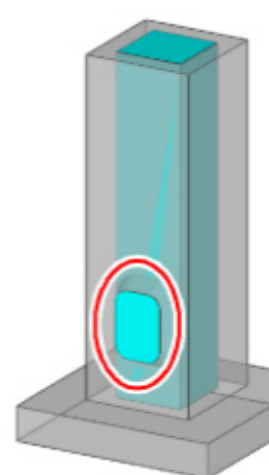
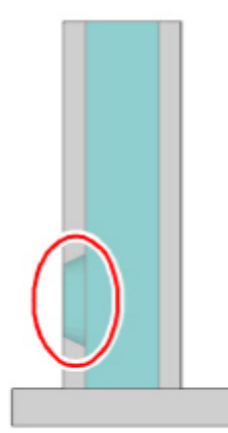
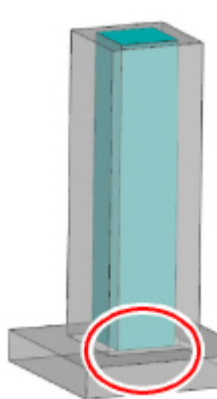
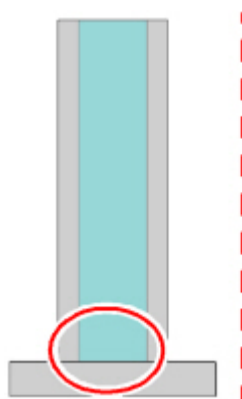
Tiskárny PolyJet najdou uplatnění především v sektorech, kde je potřeba dosažení přesných rozměrů, složitých detailů, plné barevnosti nebo využití více materiálů v jednom modelu. Velké využití je tedy v oblasti prototypů, kde díky možnosti tisknout až 500 000 barev, materiálů od křehkých po flexibilní a vytváření různých textur, dosáhneme velice realistických modelů. [18]

Dalším využitím je poté možnost tisknout biokompatibilní materiály, které mají podobné vlastnosti jako lidské tkáně, a tak můžou výtisky sloužit jako implantáty či jako modely na cvičnou operaci. [18; 28]

## 8 Omezení technologie

Jak bylo již zmíněno v podkapitole „Drsnost povrchu“, technologie PolyJet v normálním provozu není schopná tisknout samonosné úhly a automaticky pod ně přidá podporu. To má za důsledek to, že je materiál po odstranění vždy matný. Chceme-li lesklý povrch, musíme po tisku přistoupit k dalším úpravám. [14]

Podpurný materiál je na bázi hydrogelu, a tak je jeho odstranění z úzkých a hlubokých otvorů velice obtížné a je potřeba na to myslet již při návrhu součásti, jak je vidět na obrázcích č 16 a 17. [14]



Obrázek 16 Problematické řešení dutiny [14]

Obrázek 17 Vylepšené řešení dutiny [14]

Pokud tedy budeme chtít vytisknout odlehčenou strukturu uvnitř plného materiálu, ať už kvůli úspoře materiálu či odlehčení dílu, není to s klasickým nastavením tiskárny možné. Tiskárna zde vždy vytiskne support, neboli podporu, který nebudeme schopni odstranit. [14]

Pokud tiskneme velmi drobný detail, například barevný obraz, pak je pro nás důležitá orientace dílu na paletě, jelikož má tiskárna jiné rozlišení v ose X a v ose Y. V ose X je to 600 DPI a v ose Y 300 DPI. [16]

## 9 Návrh experimentu

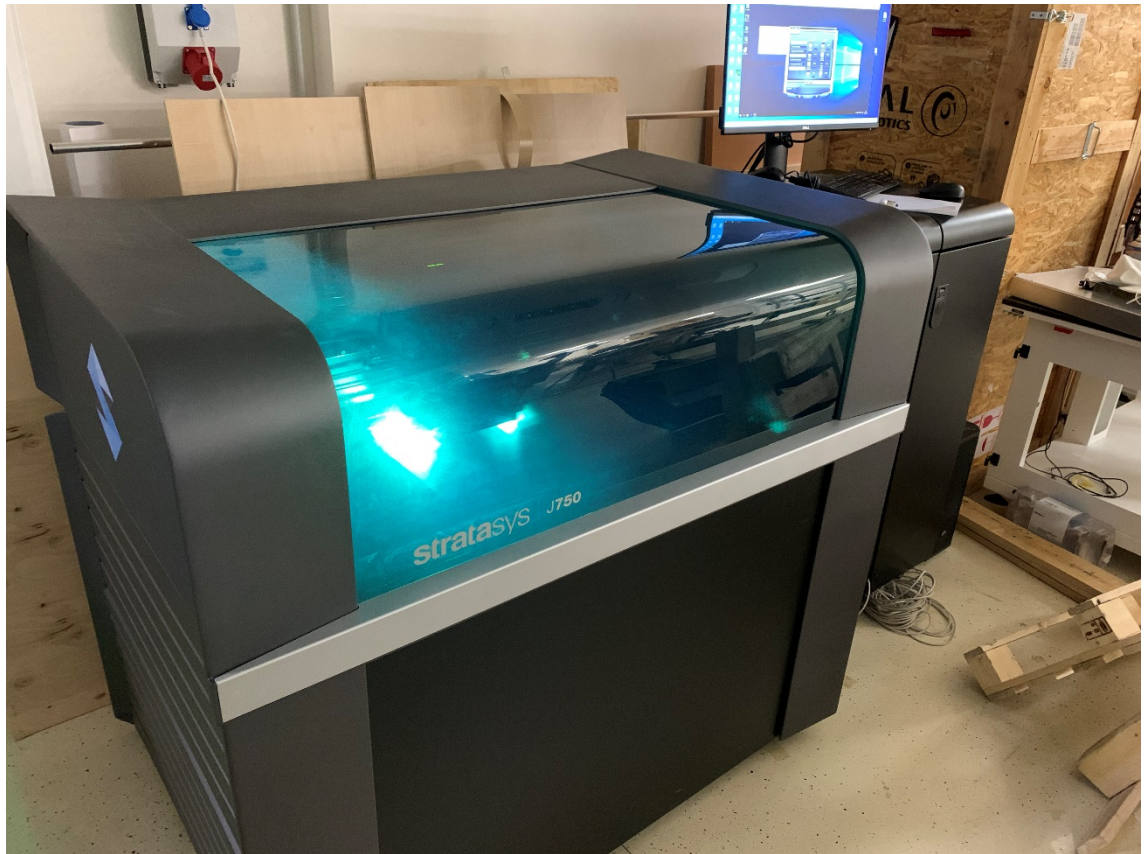
Jelikož byl na tiskárnu, na které jsem pracoval, nainstalován výzkumný balíček – Reaserch package, který otevírá nové možnosti tiskárny, provedl jsem experiment na tisk samonosných úhlů pomocí Air Void.

Dále se otevřela možnost tisknout materiály, které zůstávají tekuté. Proto provedu experiment na tisk dílů, které jako podporu využívají tekutinu, která je po vytištění snadno odstranitelná.

Poslední část se zabývá vytvořením postupu na tisk průsvitných modelů z pevnostní analýzy s využitím softwarové nástavby Voxel Print.

## 10 Stratasys J750

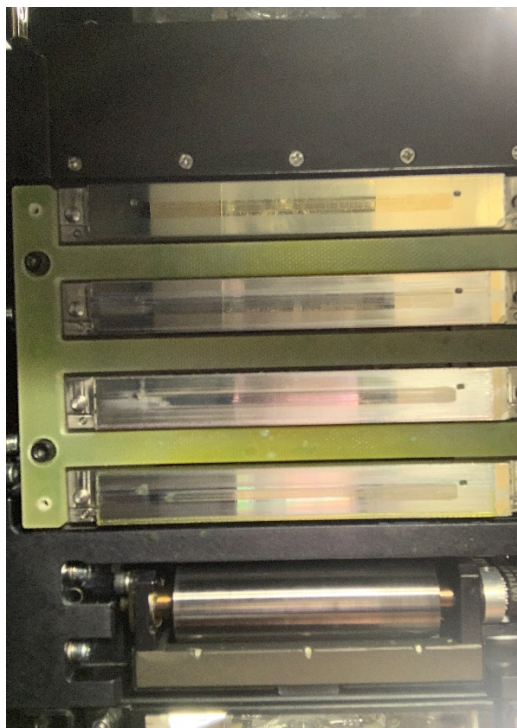
Tiskárna, na které jsem provedl všechny experimenty, je Stratasys J750 na obrázku 18.



*Obrázek 18 Stratasys J750*

Jedná se o tiskárnu PolyJet technologie s pracovním prostorem 490 x 390 x 200 mm. Tiskárna má 4 tiskové hlavy, jak je vidět na obrázku č. 19. 3 tiskové hlavy slouží pro tisk konstrukčního materiálu a čtvrtá tisková hlava slouží pro tisk podpor. [29]



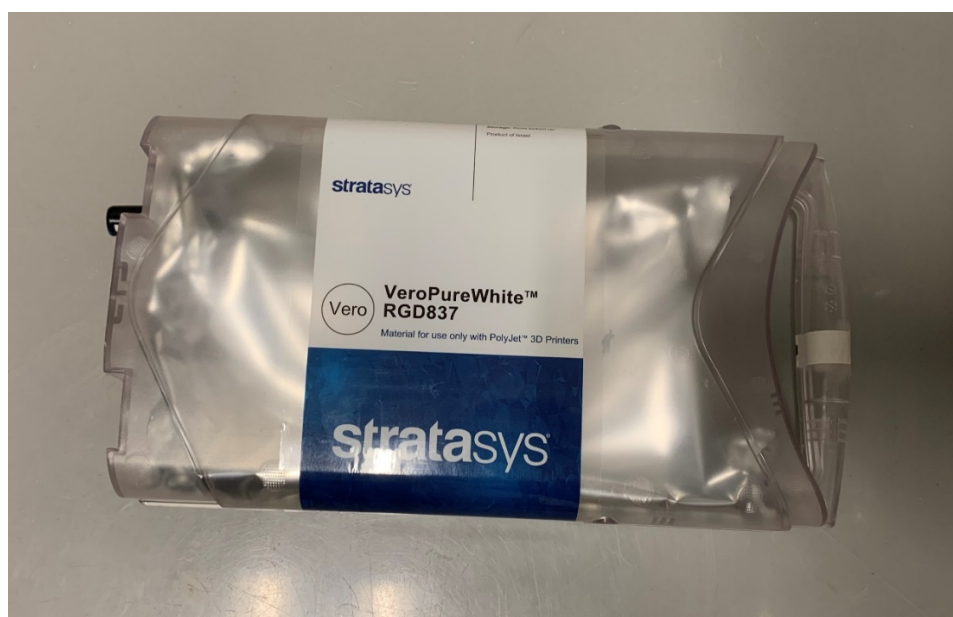


*Obrázek 19 Tiskové hlavy*



*Obrázek 20 Zásobník materiálu*

Zásobník materiálů na obrázku č. 20 pojme až šest základních materiálů a dále má dva sloty pro materiál podpor. Materiál se uchovává ve speciálních vacích, které jsou následně uloženy v plastovém obalu, aby nedošlo k protržení, jak vidíme na obrázku č. 21.



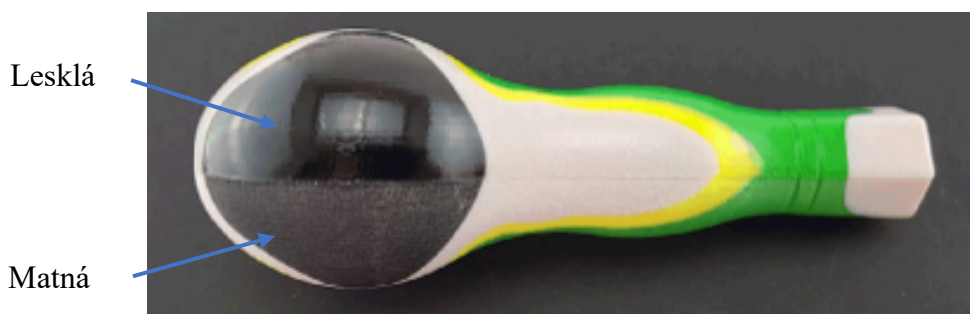
*Obrázek 21 Kazeta materiálu*

# 11 Samonosné úhly

V normálním nastavení tiskárny není možné samonosné úhly tisknout, jak jsem popsal v kapitole Omezení technologie. Nicméně právě díky tomu, že byl na tiskárnu nainstalován výzkumný balíček, přibyl mezi volbu materiálů materiál Air Void. Nyní je tedy možnost vytisknout tělo modelu ze vzduchu.

## 11.1 Motivace experimentu

Momentálně, když chceme vytisknout díl s lesklým povrchem, který má ale některé stěny v úhlu menším než 90 stupňů, tak bude vždy tato část matná. Tiskárna zde automaticky přidá podpory, jak můžeme vidět na obrázku č. 22.



Obrázek 22 Rukojeť šroubováku s lesklým povrchem (upraveno) [16]

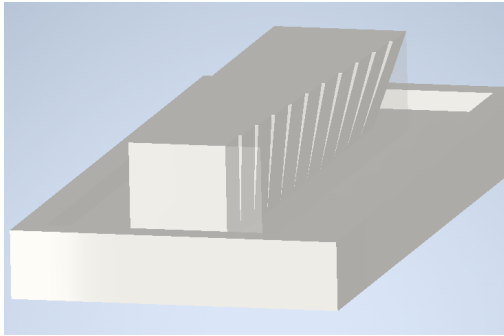
Pokud by tedy tiskárna podpory nepřidala, byl by celý povrch lesklý a nebylo by třeba dalších úprav pro docílení požadovaného povrchu. Zároveň by se takto ušetřilo za materiál podpor.

Pokud by bylo možné vytisknout samonosné úhly, mohl bych následně vytvořit nějakou formu lattice struktury – tedy odlehčené struktury.

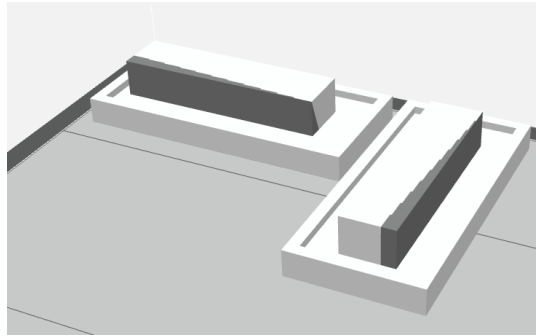
## 11.2 Specifikace experimentu

Můj pokus vychází z experimentu Nicholase Alexandra Meisela kde na tiskárně Objet 350 Connex provedl experiment na určení samonosných úhlů. Jelikož používám jinou tiskárnu a materiál, ověřím tímto experimentem jím naměřené údaje.

Vytvořil jsem stejný testovací artefakt s odstupňovanými úhly jako pan Meisel. Na modelu se nachází plochy, které se po 2° přibližují k 70° jak je patrné z obrázku č. 23.

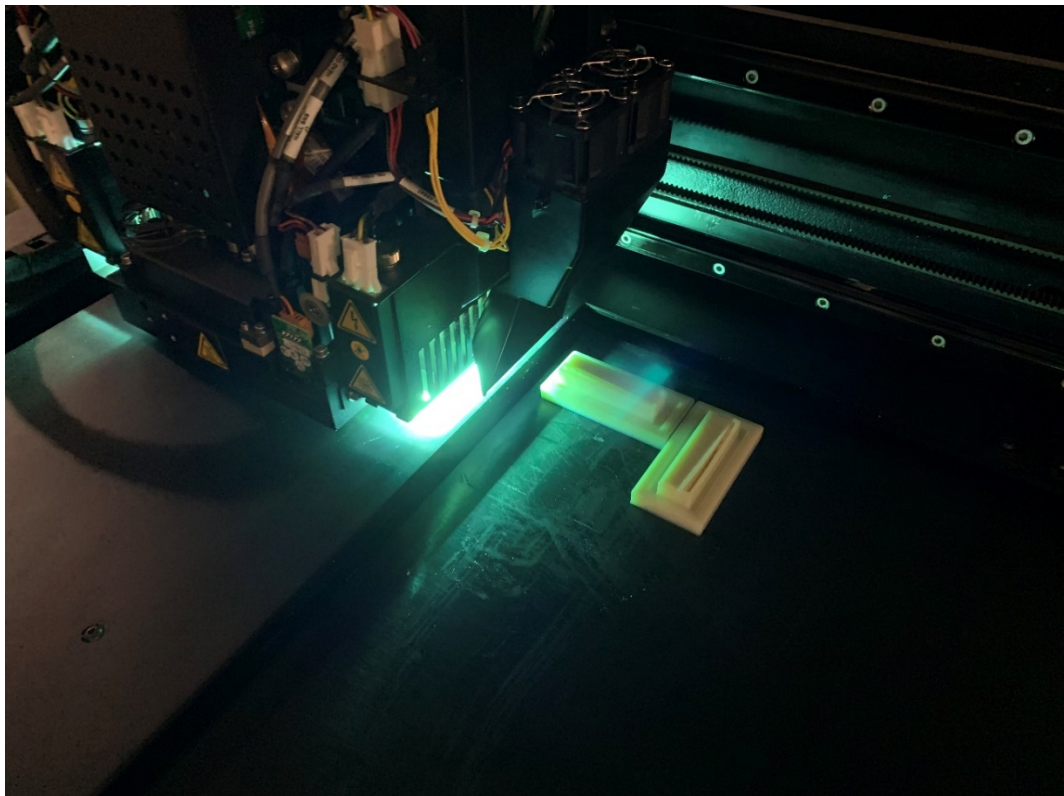


*Obrázek 23 Model v Autodesk Inventor*



*Obrázek 24 Připravený model k tisku v GrabCAD Print*

Na obrázku č. 24 je potom k vidění model v prostředí GrabCAD Print, a to ve dvou variantách. V prvním případě s plochami v ose X a ve druhém s osami v ose Y. Tímto způsobem zjistím maximální velikost samonosného úhlu v obou osách.



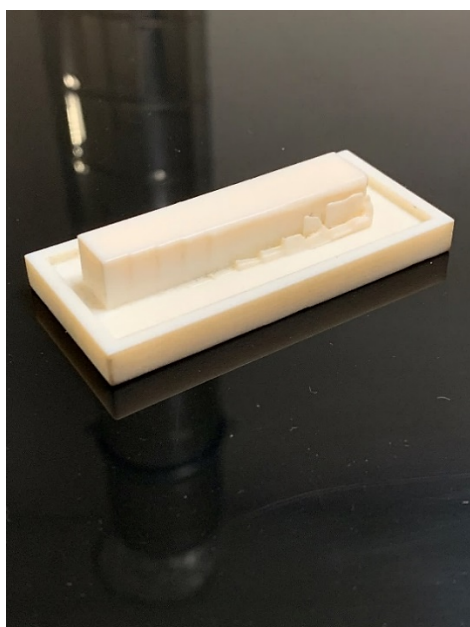
*Obrázek 25 Průběh tisku experimentu*

## 11.3 Výsledek Experimentu

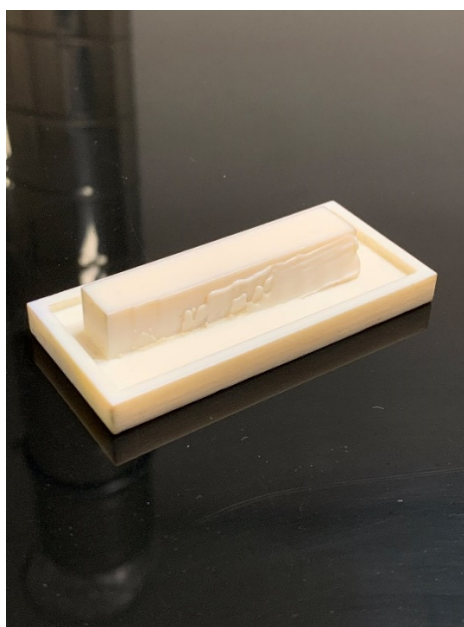
Experiment proběhl dle očekávání. Cílem bylo zjistit při jakém úhlu začne fotopolymer stékat z místa, kde má být vytisknut. Tyto úhly jsou v ose X a v ose Y jiné.

Kapičky, které jsou nanášeny nad Air Void, tedy vytváří stěnu, která je pod úhlem menším než  $90^\circ$ , jsou tištěny do vzduchu. Jediné, co drží kapičku od toho, aby stekla je povrchové napětí.

Úhly tištěné v ose X dosáhly úhlu v dostatečné kvalitě  $82^\circ$ , jak je patrné z obrázku č. 26, kdežto úhly tištěné v ose Y mají nedostatečnou kvalitu již v první zkosené ploše, což můžeme pozorovat na obrázku č. 27.



Obrázek 26 Úhly tištěné v ose X



Obrázek 27 Úhly tištěné v ose Y

Dosažený úhel v ose X byl dle očekávání, ale vzhledem k novějšímu modelu tiskárny jsem doufal v ještě lepší výsledek. To, že tiskárna v ose Y nedokáže vytisknout žádný samonosný úhel bylo zklamáním, jelikož to značně omezuje možnosti pro další využití.

Tímto experimentem jsem tedy potvrdil, že tiskárna Stratasys J750 dosahuje stejných výsledků jako tiskárna Objet 350 Connex při tisku samonosných úhlů z materiálu ze skupiny Vero.



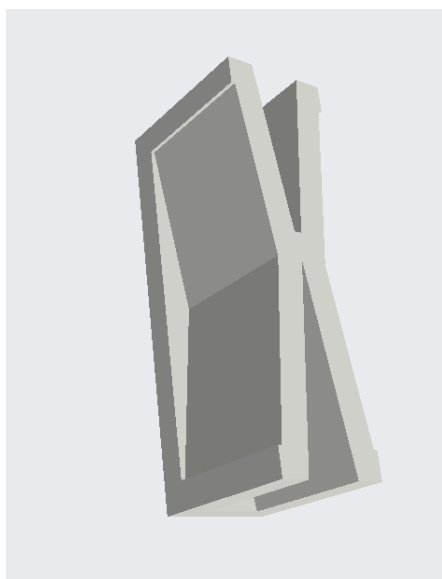
## 12 Lattice struktura

Jak jsem již popsal v předešlých kapitolách, tisku odlehčených struktur uvnitř modelu nelze dosáhnout, jelikož by bylo nemožné odstranit podpory. Dle výsledku předešlého experimentu jsem za využití Air Void navrhl lattice strukturu, která je tisknutelná pomocí PolyJet technologie.

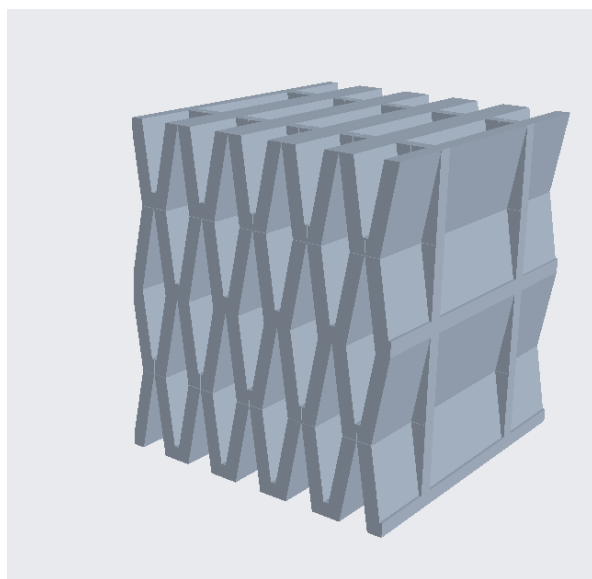
Omezení tiskárny na úhly  $8^\circ$  v ose X a  $0^\circ$  v ose Y velmi zúží výběr vhodné struktury. Žádná z běžně užívaných odlehčených struktur totiž tyto parametry nesplňuje.

### 12.1 Návrh Lattice struktury

Abych vyhověl omezením tiskárny, vytvořil jsem v programu Creo Parametrics základní prvek lattice struktury na obrázku č. 28, která se následně aplikuje na celý díl. Pro experiment jsem zvolil kvádr, který je na obrázku č. 29.



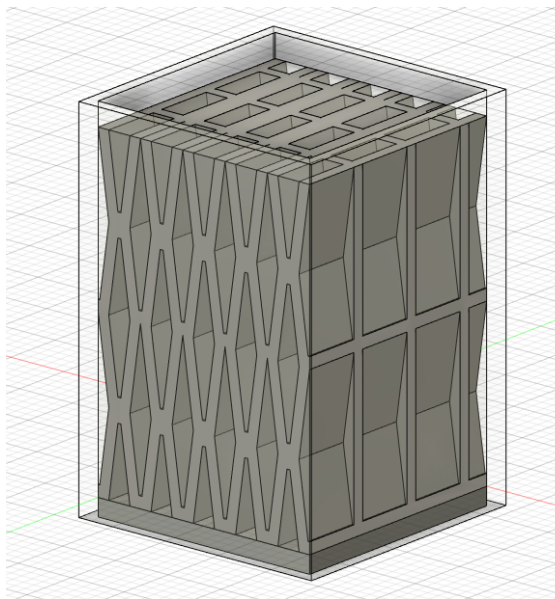
Obrázek 28 Základní prvek lattice struktury



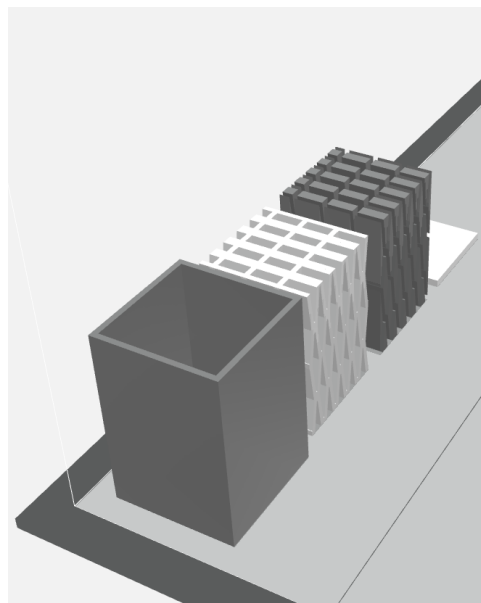
Obrázek 29 Lattice struktura

Následně jsem v programu Fusion 360 přidal do prázdných míst materiál tak, abych ho následně mohl definovat jako Air Void. Dále jsem přidal desku, na které celá struktura

stojí. Jelikož chtěla tiskárna tisknout podpory kolem celého dílu, přidal jsem ještě obal kolem celého dílu, který bude definován opět jako Air Void dle obrázku č. 30.



Obrázek 30 Připravený díl ve Fusion 360



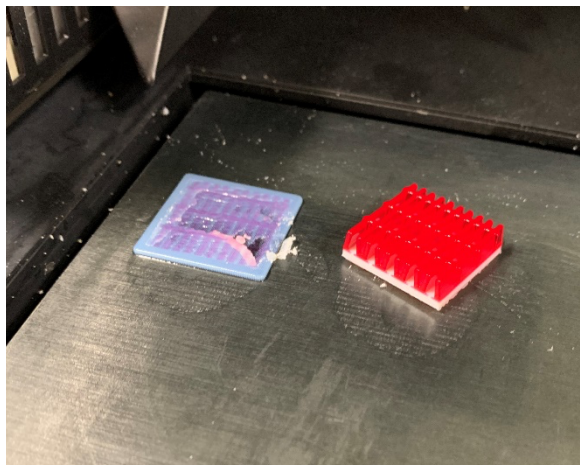
Obrázek 31 Díl s přiřazenými materiály

Následně jsem v programu Grab CAD Print definoval materiály jednotlivých těl modelu dle obrázku 31. Bílá barva reprezentuje materiál VeroPureWhite, šedá barva potom Air Void.

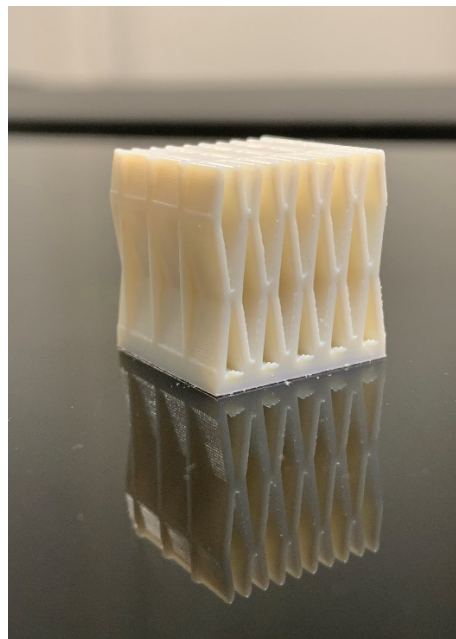
## 12.2 Výsledek experimentu

Při prvním experimentu jsem jako materiál použil Vero Magenta Vivid. Jelikož se blížila doba expirace, neměl materiál 100% vlastnosti a po vytištění několika milimetrů se na povrchu začaly objevovat větší kapičky materiálu. Do kapiček následně narážel válec, který zarovnává materiál a který díl nakonec utrl od podložky viz obrázek 32.

Na obrázku 33 je vidět, že po změně materiálu na VeroPureWhite se tisk povedl, nicméně kvalita povrchu v místech, kde jsou tištěné samonosné úhly je horší než na jiných místech.



*Obrázek 32 Nepovedený experiment s Vero  
Magenta Vivid*



*Obrázek 33 Odlehčená struktura*

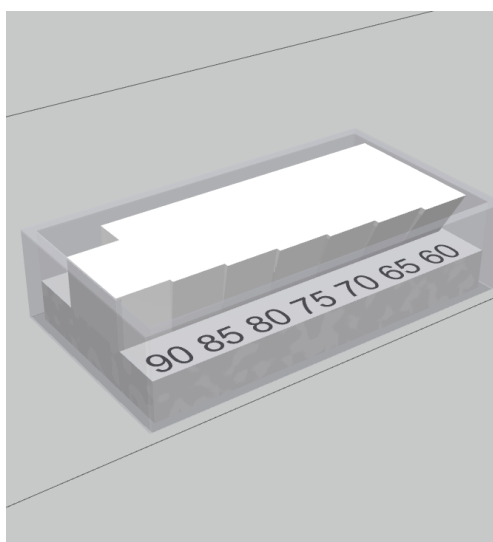
Tímto experimentem tedy bylo docíleno, že lattice struktura bude stát sama o sobě bez vygenerovaných podpor.

## 13 Tekuté podpory

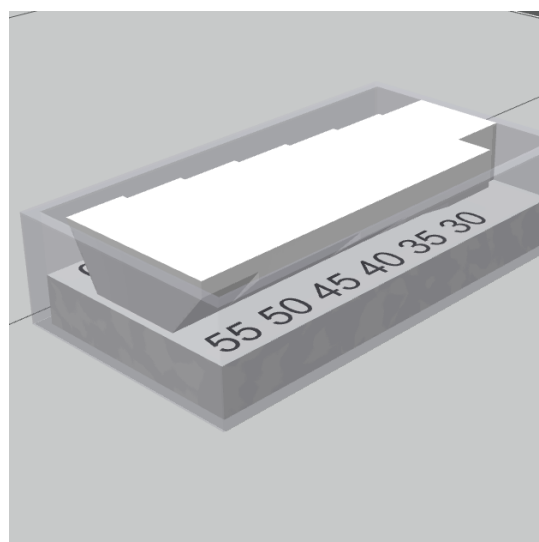
Společně s tiskem Air Void přišla s výzkumným balíčkem možnost tisknout materiály, které i po přejetí UV lampy zůstanou tekuté. Jediný materiál, který v současné době společnost Stratasys nabízí, je přípravek na čištění tiskárny a tiskových hlav – Cleanser.

### 13.1 Návrh experimentu

Model je velice podobný modelu, který jsem využil u experimentu při zjišťování samonosných úhlů, nicméně jsem celý experiment navrhl až do úhlu 30°. Zároveň bylo potřeba celý model připravit na tekutý support materiál, a tak jsem kolem modelu vytvořil milimetrovou bariéru, která je na obrázcích č. 34 a 35.



Obrázek 34 Experiment s tekutou podporou



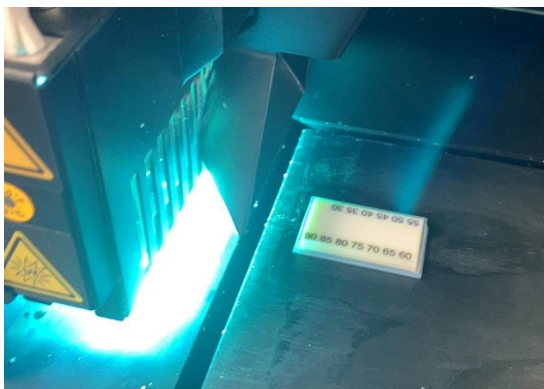
Obrázek 35 Experiment s tekutou podporou

Pro lepší orientaci po tisku jsem jednotlivé stěny doplnil o popisky jednotlivých úhlů.

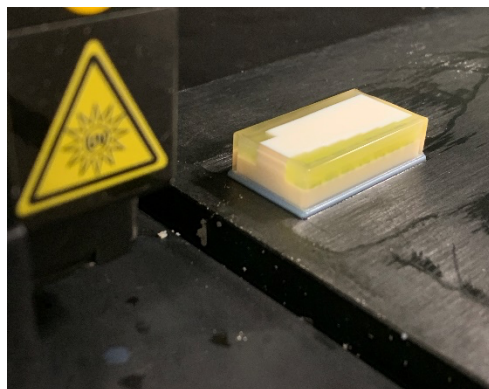


## 13.2 Výsledek experimentu

Samotný tisk probíhal dle předpokladů a jeho průběh je možné vidět na obrázcích č. 36 a 37.



*Obrázek 36 Průběh tisku tekutých podpor*



*Obrázek 37 Průběh tisku tekutých podpor*

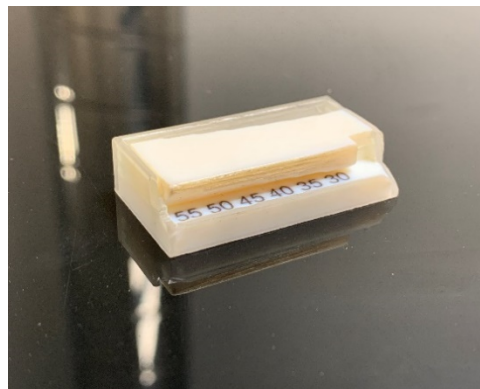
Stěny o tloušťce 1 mm na udržení Cleanseru stačily a tekutina nikam nevytekla.

Odstranění podpory bylo velice jednoduché, jelikož stačilo tekutinu vylít a případně dočistit vodou.

Zároveň se povedlo vytisknout všechny úhly, které v tomto experimentu byly, a to tedy do 30°. Nicméně kvalita povrchu, který byl v kontaktu s čistící tekutinou, byla již při pozorování pouhým pohledem velice špatná až nevyhovující. Především je to patrné na částech z materiálu VeroClear, kde plochy, které byly v přímém kontaktu, zbělaly a částečně se drolily, jak je vidět na obrázcích 38 a 39.



*Obrázek 38 Výsledek experimentu s tekutými podporami*



*Obrázek 39 Výsledek experimentu s tekutými podporami, po odstranění stěny*

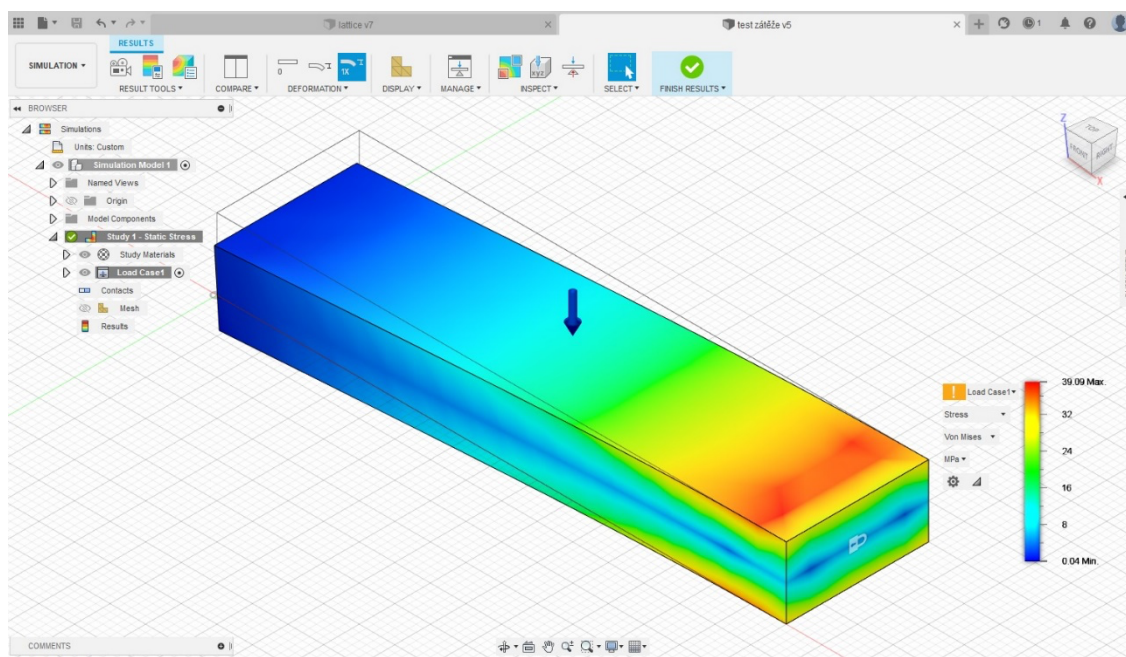
Došel jsem tak k závěru, že využití tekutých podpor má velký vliv na čas úprav po tisku a celkově zrychlí celkový proces výroby dílu. Nicméně při využití materiálu Cleanser jsou výsledné povrchy nepoužitelné, a tak není v současné době vhodné nahrazovat tradiční hydrogelové podpory podporami tekutými. Pokud ovšem bude uveden nový materiál, který nebude reagovat s ostatními fotopolymery, je toto řešení na určité díly vhodné.

## 14 Tisk analýzy MKP

Technologie PolyJet vyniká především při tvorbě prototypů a vizualizaci plnobarevných modelů. Proto jsem se rozhodl vytvořit způsob, jak by se dala vytisknout analýza metodou konečných prvků (MKP) tak, aby byl model průhledný a plnobarevný.

### 14.1 Tvorba digitálního modelu

Rozhodl jsem se používat programy, které jsou buďto volně přístupné pro širokou veřejnost, nebo mají aspoň studentské verze. Proto jsem provedl analýzu metodou konečných prvků v programu Autodesk Fusion 360. Jako vzorový model jsem vytvořil nosník, který jsem na jednom konci uchytil a zatížil ho po celé horní ploše. Výsledek v programu Fusion 360 je na obrázku č. 40.



Obrázek 40 Výsledek MKP v programu Fusion 360

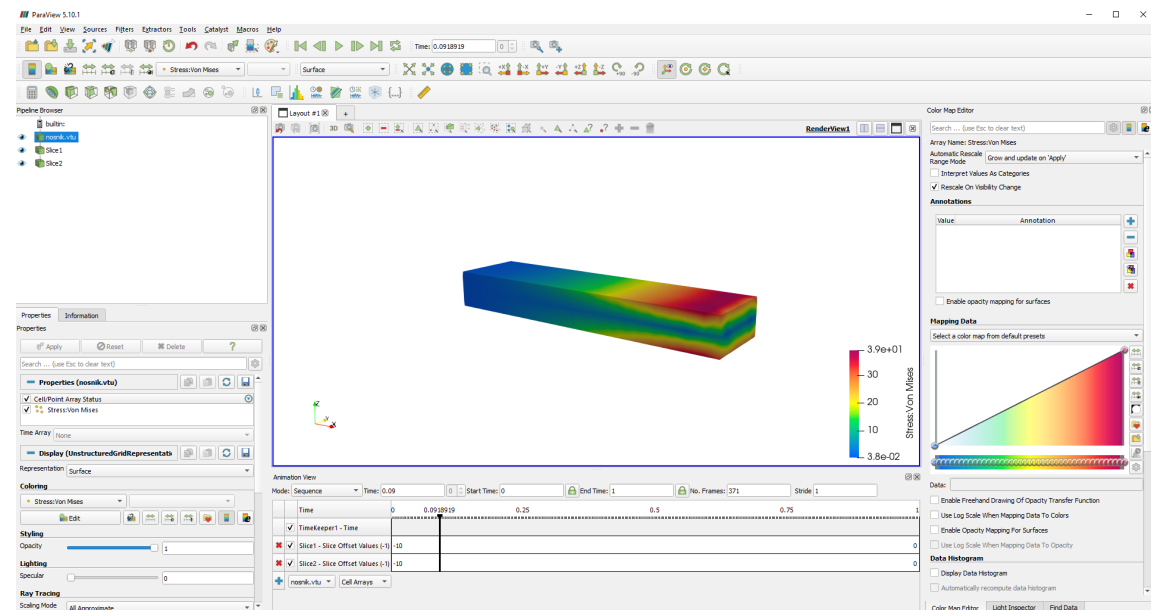
Jelikož se ale nedá výsledek exportovat ve formátu, aby jej bylo možné vytisknout, je potřeba tento soubor vložit do programu ParaView.

Autodesk Fusion 360 na to nemá žádnou přednastavenou funkci, nicméně je možnost exportovat soubor ve formátu .vtu přes příkazový řádek a to příkazem: *SimResults.ExportActiveResults C:\“jméno souboru“.vtu*.

## 14.2 Tvorba PNG snímků

Jelikož není možné vytvořit přímo ze simulace soubor, který by se na tiskárně vytiskl průhledný a plnobarevný, využil jsem k tvorbě modelu nastavbu Voxel Print. Pro tuto nastavbu je nutné vytvořit PNG snímky, kde jednotlivé barvy definují materiály tiskárny.

Proto jsem soubor vtu nahrál do programu ParaView. Zde jsem vytvořil dvě řezné roviny s normálou ve směru osy Z. Následně jsem mezi nimi spustil animaci o počtu snímků, které dostaneme výpočtem  $n = h/0,027$  mm, kde n je počet snímků a h je velikost modelu v ose Z. Celé nastavení v ParaView je na obrázku 41.



Obrázek 41 Prostředí ParaView

Získané PNG snímky se ovšem skládají z celého spektra barev. Pro to, aby se snímky mohly nahrát do Voxel Print, musejí obsahovat pixely o maximálně 6 barvách. Z tohoto důvodu jsem musel vytvořit program, který snímky upraví.

## 14.3 Tvorba programu

Vzhledem k tomu, že programovací jazyk, ve kterém jsem nejzkušenější je Python a pro práci s PNG snímky je velice vhodný, rozhodl jsem se ho použít i pro tento program.

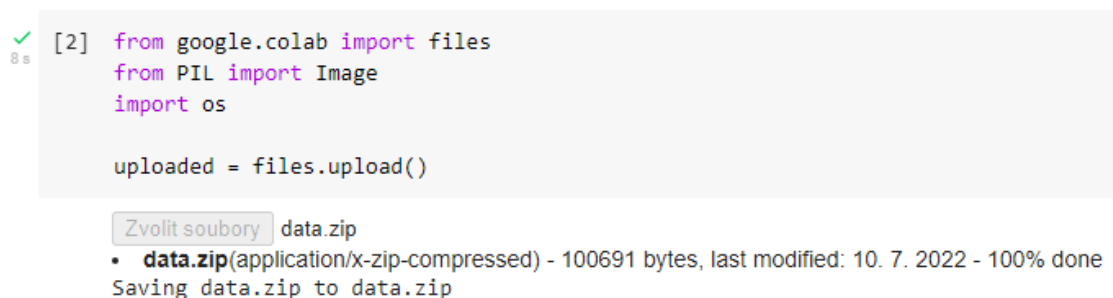
Jako prostředí pro psaní kódu jsem zvolil Google Colab. Jedná se o cloudové prostředí, které je dostupné z webového prohlížeče.

Velikou výhodou je, že jsem si nemusel stahovat všechny knihovny, které jsou nutné pro správný chod mého programu, ale všechny jsou v prostředí dostupné. Mezi přednosti Google Colab dále patří možnost spouštět kód po jednotlivých buňkách. Zároveň se mezi buňky kódu může vložit textové pole, ve kterém může být funkce programu lépe popsána a celkově tím kód zpřehlednit.

Nevýhodou je, že se do cloudového prostředí musí snímky na začátku ručně nahrát a program si je nemůže automaticky vzít ze složky na pevném disku. Jelikož jsem připravoval vždy jen jednu součást, není to pro mě problém.

### 14.3.1 Nahrání vstupních dat

Nejdříve jsem si připravil pracovní prostředí a jelikož se v programu pracuje se soubory, potřeboval jsem knihovnu *Google.colab-files*. Obdobně jsem pro práci s obrázky zvolil knihovnu *PIL (Python Imaging Library)*, která je open source a existuje k ní rozsáhlá dokumentace. To je vidět na obrázku 42. Po spuštění této části kódu mě program vyzval k nahrání komprimovaného souboru se vstupními snímky.



```
[2] from google.colab import files
    from PIL import Image
    import os

    uploaded = files.upload()
```

Zvolit soubory data.zip

- data.zip(application/x-zip-compressed) - 100691 bytes, last modified: 10. 7. 2022 - 100% done

Saving data.zip to data.zip

Obrázek 42 Funkce nahrání vstupních dat

Pro kontrolu, zda byl nahrán správný soubor se vypíše jeho jméno a velikost v bytech. Jelikož je funkcí `files.upload()` možné nahrát více souborů, ujistím se tak, že jsem nahrál opravdu jen jeden. To udělám přes buňku s kódem na obrázku 43.

```
0s [3] for fn in uploaded.keys():  
      print('Nahrál se soubor "{name}" s délkou {length} B'.format(name=fn, length=len(uploaded[fn])))  
  
Nahrál se soubor "data.zip" s délkou 100691 B
```

Obrázek 43 Nahrání vstupních dat

Pro ukládání a práci s daty jsem si zvolil složku `content`, na obrázku č. 44, kam jsem dekomprimoval do podsložky `data` snímky z nahraného souboru `zip`.

```
0s [4] !unzip /content/data.zip -d /content/data/  
  
Archive: /content/data.zip  
  inflating: /content/data/nosnik.0001.png  
  inflating: /content/data/nosnik.0002.png  
  inflating: /content/data/nosnik.0003.png  
  inflating: /content/data/nosnik.0004.png
```

Obrázek 44 Dekomprimace vstupních dat

### 14.3.2 Převod všech barev pouze na množinu definovaných barev

Knihovna PIL umí pomocí funkce `quantize()` převést velkou množinu barev na menší, mnou předdefinovanou množinu barev, takovým způsobem, že podobné odstíny se namapují na stejnou barvu tak, aby přesnost barev v obrázku zůstala i v menší množině barev co nejpřesnější. Celá funkce je na obrázku 46.

Do palety pro tuto funkci jsem vybral RGB hodnoty přímo materiálů, které jsou v tiskárně dostupné. Jejich barvy jsou na obrázku 45.



Obrázek 45 Přehled barev jednotlivých materiálů

Tyto hodnoty jsem vybral především proto, aby byl výtisk barevně co nejbližší barvám simulace.

```
✓ [5] def cga_quantize(image):  
0 s     pal_image= Image.new("P", (1,1))  
     pal_image.putpalette( (  
         0,0,0,      # Černé pozadí  
         0,137,166,  # VeroCY-V  
         198,0,88,   # VeroMGT-V  
         240,197,0   # VeroYL-V  
     ) + (255,255,255)*251)  
     return image.convert("RGB").quantize(palette=pal_image)
```

Obrázek 46 Funkce pro převod barev pixelů

V bloku na obrázku č. 47 jsem definoval složku pro vstupní data pro další část programu a také složku pro ukládání výstupů. Kvůli možnosti opakovaného spouštění byl obsah výstupní složky promazán.

```
✓ [6] dir = "/content/data/"  
0 s     save_dir = "/content/converted/"  
     !mkdir -p /content/converted/  
     !rm -f /content/converted/*
```

Obrázek 47 Vytvoření složky converted

V buňce kódu č. 48 jsem prošel všechny soubory ve složce definované v proměnné *dir*, vzal jsem z nich pouze obrázky, čili soubory pouze s koncovkou *.png*. Každý tento obrázek se otevřel a převedl se do formátu RGB. Pomocí funkce *cga\_quantize(image)* jsem převedl barvy a obrázek se uložil do předem vytvořené složky.

```
✓ [7] for fn in os.listdir(dir):  
0 s     if fn.endswith(".png"):  
         image = Image.open(dir + fn).convert('RGB')  
         converted = cga_quantize(image)  
         converted.save(save_dir + fn)
```

Obrázek 48 Převedení barev



### 14.3.3 Změna vnitřních bílých pixelů na jinou barvu

Jelikož v dalším kroku, který je blíže specifikován v kapitole Tvorba GCVF souboru bylo nastaveno, že bílá barva je pozadí a software mě tak nebude vyzívat k přiřazení materiálu pro tuto barvu. Tím by mi vznikly v modelu nepřesnosti, a tak jsou tyto místa nahrazena jinou barvou.

Musel jsem si definovat RGB hodnoty pro bílou barvu a zároveň pro barvu, na kterou se vybraný pixel změní, což jsem udělal v bloku kódu na obrázku 49. Vybral jsem si zelenou barvu, jelikož je při vizuální kontrole v průběhu psaní kódu jasně zřetelná. Tato barva reprezentuje materiál VeroClear.

```
✓ [9] bila = (255,255,255)
0s      zelena = (0,255,0) # mark_color

      !mkdir -p /content/colored/
      !rm -f /content/colored/*
```

Obrázek 49 Definice používaných barev a tvorba složky colored

Funkce *colorIfSurround()* obarvuje pixely zadané barvy na barvu druhou, pokud má daný pixel více než  $n$  sousedních pixelů jiné než původní barvy. Vstupní obrázek má bílé pozadí, které jsem však nechtěl měnit, aby zůstaly rozměry modelu stejné. Bylo potřeba touto úpravou obarvit pouze pixely, kterým byla přiřazena bílá barva a jsou uvnitř modelu. Prošel jsem tedy vstupní obrázek pixel po pixelu a pokud jsem narazil na pixel dané barvy, zkontroloval jsem barvu sousedních pixelů. Pokud jsem zjistil, že je sousedních pixelů s jinou barvou je více než tři, změnil se tento pixel na `mark_color` – tedy zelenou.

Pro každý pixel jsem kontroloval čtyři sousedy, což u velkého množství dat může být velice výpočetně a časově náročné. Z tohoto důvodu jsem přidal omezující podmínku, která již po kontrole prvních třech sousedů rozhodne, zda změnit barvu pixelu. Tento krok vede až 25% zrychlení části programu. Celá funkce je ukázána na obrázku č. 50.



```

✓ [8] def colorIfSurround(image_to_transform, ignore_color, mark_color, n):
0s
    # n = minimální počet sousedů s jinou než zvolenou barvou
    output_image=image_to_transform.copy().convert('RGB')
    for x in range(output_image.width):
        for y in range(output_image.height):
            pocet_sousedu = 0
            # pozor na krajní hodnoty abychom nešahali mimo obrázek
            if (output_image.getpixel((x,y)) == ignore_color):
                if (1 < x < output_image.width-1) and (1 < y < output_image.height-1):
                    if output_image.getpixel((x-1,y )) != ignore_color:
                        pocet_sousedu += 1
                    if output_image.getpixel((x ,y-1)) != ignore_color:
                        pocet_sousedu += 1
                    if output_image.getpixel((x+1,y )) != ignore_color:
                        pocet_sousedu += 1
                    if pocet_sousedu >= n:
                        output_image.putpixel((x,y), mark_color)
                        continue
                    if output_image.getpixel((x ,y+1)) != ignore_color:
                        pocet_sousedu += 1
            # pokud je počet obarvených sousedů větší než "n", změň tento pixel na mark_color barvu
            if pocet_sousedu >= n:
                output_image.putpixel((x,y), mark_color)
    return output_image

```

Obrázek 50 Funkce `colorIfSurround()`

Následně jsem v bloku na obrázku č. 51 prošel všechny snímky a aplikoval na ně funkci `colorIfSurround()`. Všechny se následně uložily, do složky `colored` odkud s nimi dále pracuji.

```

✓ [10] for fn in os.listdir("/content/converted/"):
24s
    if fn.endswith(".png"):
        image = Image.open("/content/converted/" + fn).convert('RGB')
        converted = colorIfSurround(image,bila,zelena,3)
        converted.save("/content/colored/" + fn)

```

Obrázek 51 Obarvení vnitřních pixelů na `mark_color`

#### 14.3.4 Změna všech černých pixelů na jinou barvu

Jelikož je počet materiálů, které můžu na tiskárně v jeden okamžik tisknout omezen, nemohu mít jako materiál ještě černou v podobě VeroBlackPlus. Proto jsem v bloku kódu na obrázku 52 prošel všechny snímky a změnil `old_color` – tedy černou na `new_color` – opět zelenou, která reprezentuje materiál VeroClear.

Funkce funguje na stejném principu jako funkce na obrázku č. 50, ale mění barvu u všech pixelů, které splňují podmínku vybrané barvy.

```

✓ [11] def black(image_to_transform, old_color, new_color):
0s      output_image = image_to_transform.copy().convert('RGB')
      width = output_image.size[0]
      height = output_image.size[1]
      for x in range(0,width):
        for y in range(0,height):
          pixel = output_image.getpixel((x,y))
          if (pixel == old_color):
            output_image.putpixel((x,y),new_color)

      return output_image

```

Obrázek 52 Funkce změny černých pixelů

Poté co jsem definoval, co má funkce dělat, jsem vytvořil složku *black* do které se ukládají snímky a zajišťuji, že je prázdná dle kódu na obrázku 53.

```

✓ [12] !mkdir -p /content/black/
0s      !rm -f /content/black/*

```

Obrázek 53 Vytvoření složky *black*

Dalším krokem bylo definovat RGB hodnoty barev, které je potřeba měnit a funkci *black()* aplikovat na všechny snímky dle obrázku 54.

```

✓ [13] cerna = (0,0,0)
5s      zelena = (0,255,0)

      for fn in os.listdir("/content/colored/"):
        if fn.endswith(".png"):
          image = Image.open("/content/colored/" + fn).convert('RGB')
          converted = black(image,cerna,zelena)
          converted.save("/content/black/" + fn)

```

Obrázek 54 Definice používaných barev a spuštění funkce *black()*

### 14.3.5 Zdvojení pixelů v ose X

Jelikož je rozlišení tiskárny 600x300 DPI, musí být počet pixelů v ose X dvojnásobný, aby následně vytištěný díl měl rozměry shodné s modelem simulace.

Proto jsem v bloku kódu na obrázku 55 zavedl funkci `zdvojenaOsa()`, ve které byly změněny rozměry png snímků. Funkce pracuje tak, že na nově vytvořený pixel zkopíruje RGB hodnotu pixelu vlevo od něj.

```
✓ [17] def zdvojenaOsa(image_to_transform):  
0s     width, height = image_to_transform.size  
     output_image=image_to_transform.copy().convert('RGB').resize((width*2,height),resample=0)  
  
     return output_image
```

Obrázek 55 Funkce zdvojení pixelů v ose X

### 14.3.6 Vytvoření souboru zip z uložených složek

Jedním z posledních kroků je komprimace pracovních složek. Jelikož jsem v kódu často upravoval i starší části kódu a potřeboval jsem ověřit jejich funkčnost, zachoval jsem stahování všech složek v tomto bloku kódu, který je na obrázku 56. Pouze složky, které jsem nechtěl v daný moment stahovat, byly ponechány v komentáři.

```
▶ !rm -f hotovo.zip  
  
#!zip hotovo.zip /content/converted/*  
#!zip hotovo.zip /content/colored/*  
#!zip hotovo.zip /content/mrizka/*  
#!zip hotovo.zip /content/pruhy_diagonal/*  
#!zip hotovo.zip /content/pruhy_hor/*  
#!zip hotovo.zip /content/pruhy_ver/*  
#!zip hotovo.zip /content/tecky/*  
!zip hotovo.zip /content/zdvojenaOsa/*  
#!zip hotovo.zip /content/black/*  
#!zip hotovo.zip /content/border/*
```

Obrázek 56 Komprimace pracovních složek

### 14.3.7 Stažení zkonvertovaných dat

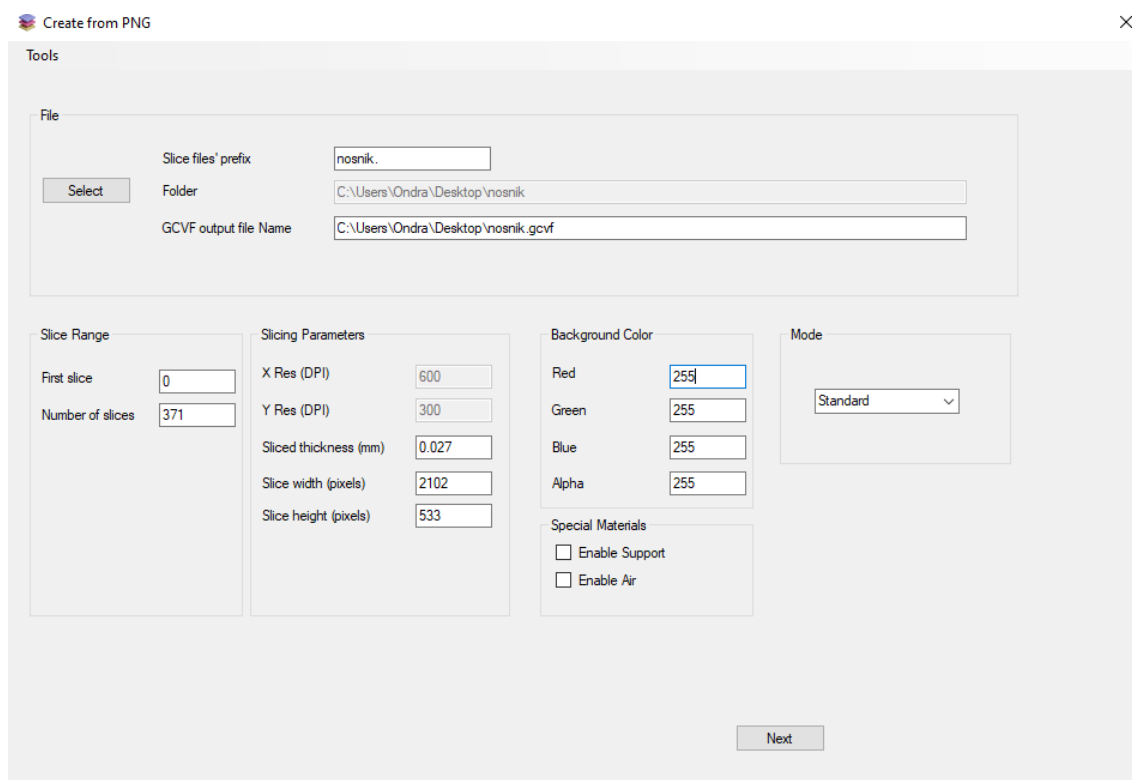
Finálním krokem je stažení komprimovaného souboru. To jsem provedl příkazem na obrázku 57.

```
files.download('hotovo.zip')
```

Obrázek 57 Stažení konečného komprimovaného souboru

## 14.4 Tvorba GCVF souboru

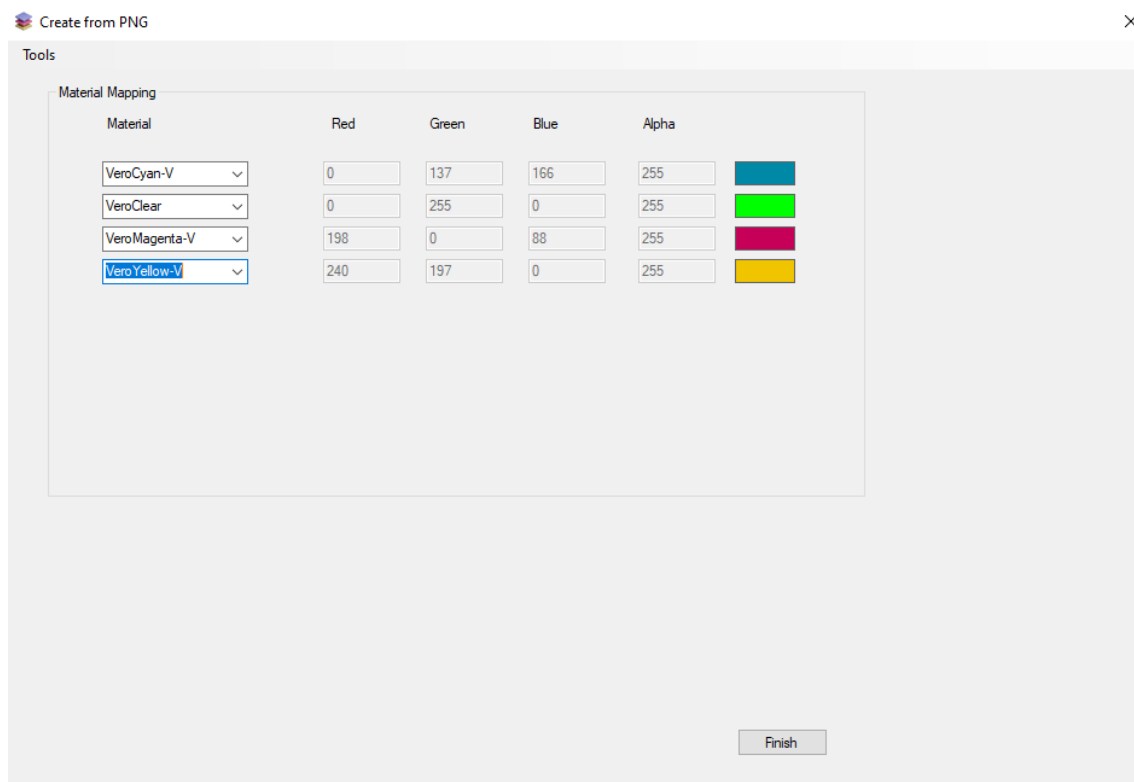
PNG snímky, které jsem upravil pomocí mého programu byly nahrány do nastavy aplikace GrabCAD – Voxel Print. Po otevření Voxel Print bylo potřeba vyplnit určité údaje o PNG snímcích, jak je uvedeno na obrázku 58.



Obrázek 58 Prostředí Voxel Print

Zde bylo tedy nastaveno celé jméno svých PNG snímků. V tomto případě se jedná o „nosnik.“. Následně jsem vybral složku, ve které jsou snímky uloženy. Počet snímků a jejich rozlišení již Voxel Print doplnil sám. Na mně ještě zůstalo vyplnění barvy pozadí, kterou byl následně při přiřazování materiálů Voxel Print ignorovat.

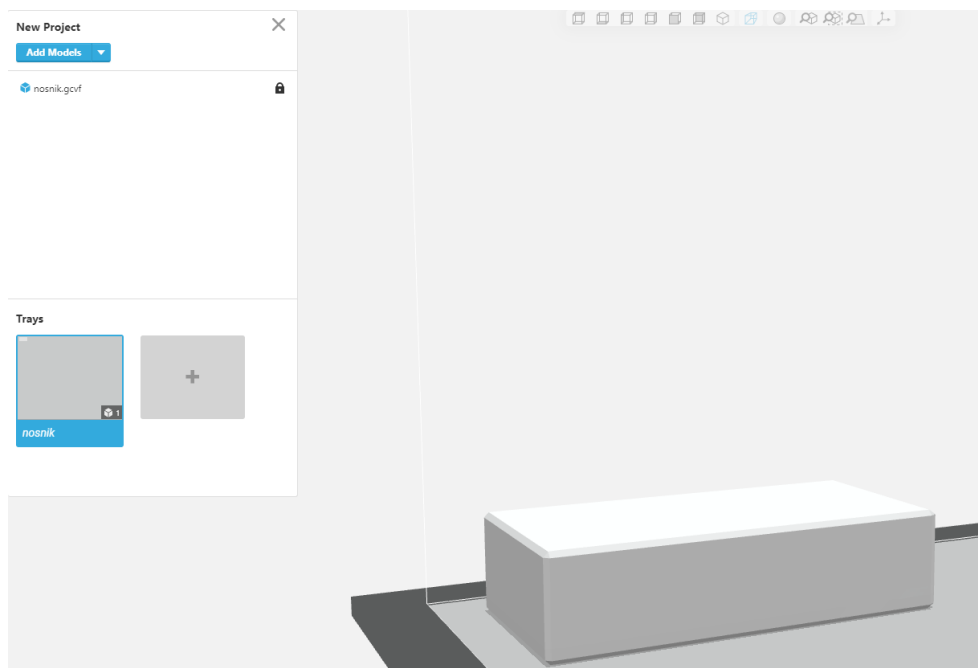
V následujícím kroku jsem již přiřadil jednotlivé materiály k barvám, které jsou definované jednotlivými snímky.



*Obrázek 59 Přiřazení materiálů ve Voxel Print*

Na obrázku č. 59 jsou vidět jednotlivé barvy, které Voxel Print ve snímcích našel a následně přiřazený materiál. Po přiřazení materiálu se vytvoří soubor GCVF, kde je již vše definováno.

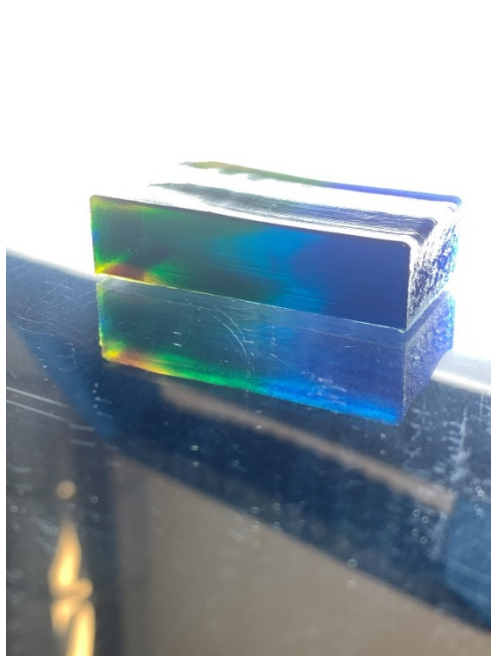
Přes aplikaci GrabCAD Print na obrázku 60 se připraví GCVF soubor k tisku a odešle do tiskárny.



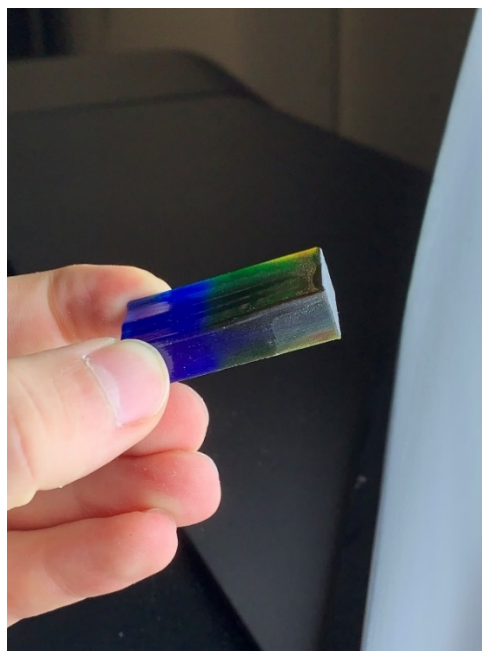
*Obrázek 60 GCVF soubor připravený k tisku*

## 14.5 Výsledek Experimentu

Experiment se jako celek zdařil a vytištěný nosník je vidět na obrázcích 61 a 62. Model je plnobarevný a průsvitný.



*Obrázek 61 Vytištěný díl nosníku*



*Obrázek 62 Vytištěný díl nosníku*

Aby bylo vidět skrze model, musí být zajištěn dostatečný zdroj světla. Pokud bych tedy chtěl tisknout díl, který má výrazně tlustší stěny než tento model nosníku, musel bych díl více zprůhlednit. I na to jsem při psaní programu myslel a zakomponoval jsem možná řešení této problematiky, a to vložением pruhů z materiálu VeroClear, které by model zesvětlily.

Tímto experimentem jsem tedy dokázal, že je tento způsob tisku MKP analýzy funkční.

## **14.6 Výhled**

V tomto experimentu jsem také řešil tisk Air Void pomocí Voxel Print a vytištění lattice struktury po MKP analýze. Program jsem na to musel uzpůsobit přidáním bloku pro vytvoření rámečku kolem modelu, který bude pozadí a bílá barva by byla následně přiřazena materiálu Air Void. GCVF soubor lattice struktury nebyl problém vytvořit, nicméně tiskárna při pokusu o tisk nahlásí neočekávaný problém. Tento problém řeším se zastoupením společnosti Stratasys a je to tedy experiment, kterým se na tuto práci může přímo navázat.

## 15 Závěr

V rámci této bakalářské práce byl nejprve v teoretické části popsán princip jednotlivých aditivních technologií. Podrobně pak byla popsána stereolitografie a metoda DLP společně s materiály používanými ve stereolitografii a následně v technologii PolyJet. Byl popsán princip technologie PolyJet, její výhody a omezení. Zároveň byly popsány materiálové možnosti této technologie a další práce s nimi za pomoci digitálních materiálů.

V praktické části byla řešena optimalizace parametrů pro tisk samonosných úhlů. Prvním experimentem bylo zjištěno, že tiskárna při nastavení s materiálem Air Void zvládne tisknout samonosné úhly ve směru osy X, ale pouze do hodnoty 8° od pravého úhlu. V ose Y bohužel tiskárna samonosné úhly tisknout nezvládne.

Tohoto zjištění potom bylo využito při tvorbě lattice struktury, při kterém bylo navrženo řešení, které respektuje naměřené omezující vlastnosti tiskárny. Návrh odlehčené struktury byl ověřen experimentem, který se zdařil a potvrdil tak navrhnutý design.

Poslední část této bakalářské práce popisuje postup tisku simulace MKP v plnobarevném a průhledném provedení. Věnuje se především volbě vhodného softwaru. Následně popisuje jednotlivých bloků programu, který zajišťuje převod výsledků analýzy na vstupní data pro Voxel Print Utility. Správnost celého postupu byla ověřena tiskem testovacího dílu nosníku.

Výsledky této práce, a především program na převod výsledků MKP analýzy na vstupní data pro Voxel Print Utility, může být využit pro tvorbu dalších modelů. Povedlo se tak splnit všechny cíle práce. Program je připraven na tisk modelů se samonosnými úhly a také na tisk dílů s tlustými stěnami prosvětlením díky pruhům z materiálu VeroClear.



## 16 Bibliografie

- [1] What is 3D printing?. In: *Hubs* [online]. .: Hubs, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/#chap>
- [2] GADAGI, Basavraj a Ramesh LEKURWALE. A review on advances in 3D metal printing. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **45**(-), 277-283 [cit. 2022-07-05]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.436
- [3] CHEMKHI, M., J. Marae DJOUDA, M.A. BOUAZIZ, J. KAUFFMANN, F. HILD a D. RETRAINT. Effects of Mechanical Post-Treatments on Additive Manufactured 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion. *Procedia CIRP* [online]. 2021, **104**(-), 957-961 [cit. 2022-07-05]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2021.11.161
- [4] Types of 3D Printing in Metal. In: *Markforged* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>
- [5] Navařování metodou WAAM. In: *Mmspektrum* [online]. -: mmspektrum, 2018 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam>
- [6] CAI, Chao, Wei Shian TEY, Jiayao CHEN, Wei ZHU, Xingjian LIU, Tong LIU, Lihua ZHAO a Kun ZHOU. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2021, **288**(-), - [cit. 2022-07-05]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2020.116882
- [7] Nekonvenční metody obrábění 9. díl. In: *Mmspektrum* [online]. -: mmspektrum, 2008 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil>

- [8] MJF (Multi Jet Fusion). In: *COTU* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [9] POPESCU, Diana, Aurelian ZAPCIU, Catalin AMZA, Florin BACIU a Rodica MARINESCU. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing* [online]. 2018, **69**(-), 157-166 [cit. 2022-07-05]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2018.05.020
- [10] *Nekonvenční metody obrábění 10. díl* [online]. -: mmspektrum, 2008 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil>
- [11] MELCHELS, Ferry P.W., Jan FEIJEN a Dirk W. GRIJPM. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials* [online]. 2010, **31**(24), 6121-6130 [cit. 2022-07-05]. ISSN 01429612. Dostupné z: doi:10.1016/j.biomaterials.2010.04.050
- [12] SCHMIDLEITHNER, Christina a Deepak M. KALASKAR. Stereolithography. CVETKOVIĆ, Dragan, ed. *3D Printing* [online]. -: -: InTech, 2018, s. - [cit. 2022-07-05]. ISBN 978-1-78923-965-2. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.78147
- [13] Polyjet & Multijet Modeling (MJM). In: *3faktor* [online]. -: -, 2020 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://3faktor.com/en/3d-printing-materials-technologies/polyjet-3d-printing-technology-overview/#1481032333032-d52a2f01-6b10>
- [14] Design for Additive Manufacturing with PolyJet. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2021 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://support.stratasys.com/SupportCenter/HTML5UserGuides/Design\\_DFAM\\_Guide\\_July\\_2020/Responsive%20HTML5/index.html#t=DOC-01103\\_x\\_Design-PJ-AM-Guide-HTML%2FDfAM\\_Guide-Chapter%2FDfAM\\_Guide-Chapter.htm](https://support.stratasys.com/SupportCenter/HTML5UserGuides/Design_DFAM_Guide_July_2020/Responsive%20HTML5/index.html#t=DOC-01103_x_Design-PJ-AM-Guide-HTML%2FDfAM_Guide-Chapter%2FDfAM_Guide-Chapter.htm)
- [15] CHENG, Yih-Lin, Chih-Hsuan CHANG a Chunliang KUO. Experimental study on leveling mechanism for material-jetting-type color 3D printing.

- Rapid Prototyping Journal* [online]. 2020, **26**(1), 11-20 [cit. 2022-07-15]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-09-2018-0227
- [16] Guide to Voxel Printing. In: *GrabCAD* [online]. -: -, 2020 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://help.grabcad.com/article/230-guide-to-voxel-printing?locale=en>
- [17] KUMAR, Krishnan a Gurunathan SARAVANA KUMAR. A STUDY ON SURFACE ROUGHNESS OF RAPID PROTOTYPES FABRICATED USING POLY-JET 3D PRINTING SYSTEM. - [online]. 2013, -(-), - [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/294090024\\_A\\_STUDY\\_ON\\_SURFACE\\_ROUGHNESS\\_OF\\_RAPID\\_PROTOTYPES\\_FABRICATED\\_USING\\_POLY-JET\\_3D\\_PRINTING\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/294090024_A_STUDY_ON_SURFACE_ROUGHNESS_OF_RAPID_PROTOTYPES_FABRICATED_USING_POLY-JET_3D_PRINTING_SYSTEM)
- [18] PolyJet Materials. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2020 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.stratasys.com/contentassets/d8d320f3a1be4bac84ceb611b79e015b/wp\\_pj\\_polyjetmaterials\\_a4\\_0122a.pdf?v=49c18a](https://www.stratasys.com/contentassets/d8d320f3a1be4bac84ceb611b79e015b/wp_pj_polyjetmaterials_a4_0122a.pdf?v=49c18a)
- [19] Vero Material Data Sheet PDF. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2020 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mds\\_pj\\_vero\\_1220a.pdf](https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mds_pj_vero_1220a.pdf)
- [20] SENNIANGIRI, N, R GIRIMURUGAN, M VAIRAVEL, C BOOPATHIRAJA, P DINESHKUMAR, A GNANAPRAKASH a S GOKULAKANNAN<sup>7</sup>. EXPLORING THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE POLYJET PRINTED VEROWHITE SPECIMENS. *JOURNAL OF CRITICAL REVIEWS* [online]. 2020, **2020**(7), 1-10 [cit. 2022-07-05]. ISSN 2394-5125. Dostupné z: <http://www.jcreview.com/admin/Uploads/Files/61b854ed0d7a00.78563050.pdf>
- [21] Tango POLYJET SIMULATED RUBBER MATERIAL. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/polyjet-materials/tango/mss\\_pj\\_tango\\_0318a.pdf?v=48e1c7](https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/polyjet-materials/tango/mss_pj_tango_0318a.pdf?v=48e1c7)

- [22] Agilus30 Family. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://support.stratasys.com/en/materials/polyjet/agilus30-family>
- [23] Digital 3D Printing Materials. In: *Proto3000* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://proto3000.com/materials/polyjet-digital-materials/>
- [24] Digital Materials Data Sheet. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2021 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/mds\\_pj\\_digitalmaterialsdatasheet\\_0122a-1.pdf?v=49c186](https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/mds_pj_digitalmaterialsdatasheet_0122a-1.pdf?v=49c186)
- [25] 3D Printing with PANTONE® Colors. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2019 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: [https://www.stratasys.com/fr/~/\\_media/Files/Best%20Practices/BP\\_PJ\\_3DPrintingWithPantone\\_0419a](https://www.stratasys.com/fr/~/_media/Files/Best%20Practices/BP_PJ_3DPrintingWithPantone_0419a)
- [26] GrabCAD Print Features. In: *GrabCAD Print* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://grabcad.com/print/features>
- [27] Voxel: The 3D Printed Pixel. In: *Stratasys* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/resources/videos/voxel-the-3d-printed-pixel/>
- [28] Working of PolyJet 3D Printers. In: *DesignTech* [online]. -: -, 2020 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.designtechproducts.com/articles/polyjet-printers-working>
- [29] Stratasys J750 / J735 Multi-material Pantone Colour 3D Printer. In: *Javelin* [online]. -: -, 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.javelin-tech.com/3d/stratasys-3d-printer/stratasys-j750/>

# Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení tiskáren [1].....	12
Obrázek 2 Schéma technologie DMLS [2].....	13
Obrázek 3 Schéma technologie DMLS [2].....	13
Obrázek 4 Tiskárna pro technologii BPE [4].....	14
Obrázek 5 Technologie WAAM [5] .....	14
Obrázek 6 Technologie WAAM [5] .....	14
Obrázek 7 Schéma technologie MJF [6].....	16
Obrázek 8 Schéma technologie FDM [9] .....	16
Obrázek 9 Schéma technologie SLA a DLP [11] .....	17
Obrázek 10 Schéma tisku keramických dílů [12] .....	20
Obrázek 11 Popis PolyJet technologie [14].....	22
Obrázek 12 Vrstvy po přejezdu tiskové hlavy [15] .....	23
Obrázek 13 Drsnost povrchu v závislosti na orientaci [17].....	24
Obrázek 14 Tolerance pro jemné detaily [14] .....	25
Obrázek 15 Model s více těly [14].....	25
Obrázek 16 Problematické řešení dutiny [14].....	34
Obrázek 17 Vylepšené řešení dutiny [14].....	34
Obrázek 18 Stratasys J750 .....	36
Obrázek 19 Tiskové hlavy .....	37

Obrázek 20 Zásobník materiálu .....	37
Obrázek 21 Kazeta materiálu .....	37
Obrázek 22 Rukojeť šroubováku s lesklým povrchem (upraveno) [16].....	38
Obrázek 23 Model v Autodesk Inventor.....	39
Obrázek 24 Připravený model k tisku v Grab CAD Print.....	39
Obrázek 25 Průběh tisku experimentu .....	39
Obrázek 26 Úhly tištěné v ose X .....	40
Obrázek 27 Úhly tištěné v ose Y .....	40
Obrázek 28 Základní prvek lattice struktury.....	41
Obrázek 29 Lattice struktura.....	41
Obrázek 30 Připravený díl ve Fusion 360.....	42
Obrázek 31 Díl s přiřazenými materiály .....	42
Obrázek 32 Nepovedený experiment s Vero Magenta Vivid .....	43
Obrázek 33 Odlehčená struktura.....	43
Obrázek 34 Experiment s tekutou podporou.....	44
Obrázek 35 Experiment s tekutou podporou.....	44
Obrázek 36 Průběh tisku tekutých podpor .....	45
Obrázek 37 Průběh tisku tekutých podpor .....	45
Obrázek 38 Výsledek experimentu s tekutými podporami .....	46
Obrázek 39 Výsledek experimentu s tekutými podporami, po odstranění stěny .....	46
Obrázek 40 Výsledek MKP v programu Fusion 360.....	47

Obrázek 41 Prostředí ParaView .....	48
Obrázek 42 Funkce nahrání vstupních dat .....	49
Obrázek 43 Nahrání vstupních dat .....	50
Obrázek 44 Dekomprimace vstupních dat .....	50
Obrázek 45 Přehled barev jednotlivých materiálů .....	50
Obrázek 46 Funkce pro převod barev pixelů .....	51
Obrázek 47 Vytvoření složky converted .....	51
Obrázek 48 Převod barev .....	51
Obrázek 49 Definice používaných barev a tvorba složky colored .....	52
Obrázek 50 Funkce colorIfSurround() .....	53
Obrázek 51 Obarvení vnitřních pixelů na mark_color .....	53
Obrázek 52 Funkce změny černých pixelů .....	54
Obrázek 53 Vytvoření složky black .....	54
Obrázek 54 Definice používaných barev a spuštění funkce black() .....	54
Obrázek 55 Funkce zdvojení pixelů v ose X .....	55
Obrázek 56 Komprimace pracovních složek .....	55
Obrázek 57 Stažení konečného komprimovaného souboru .....	55
Obrázek 58 Prostředí Voxel Print .....	56
Obrázek 59 Přiřazení materiálů ve Voxel Print .....	57
Obrázek 60 GCVF soubor připravený k tisku .....	58
Obrázek 61 Vytisknutý díl nosníku .....	58

Obrázek 62 Vytištěný díl nosníku..... 58



## Seznam tabulek

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti udávané výrobcem [19].....	27
Tabulka 2 Naměřené hodnoty [20] .....	28
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti pro TangoBlackPlus FLX980 a TangoPlus FLX930 [21].....	29
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti pro TangoBlack FLX973 [21].....	29
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti Agilus 30 materiálů [22] .....	30

## Seznam příloh

Příloha 1 Program na přípravu obrázků pro Voxel Print	
---	--