



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**Využití aditivních technologií při výrobě pohledových  
ploch**

**Production of Face Surfaces Using Additive  
Technologies**

*Diplomová práce*

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Autor práce: Bc. Jitka Kahoun Hejhalová

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán

PRAHA 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kahoun Hejhalová** Jméno: **Jitka** Osobní číslo: **457546**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Využití aditivních technologií při výrobě pohledových ploch**

Název diplomové práce anglicky:

**Production of Face Surfaces Using Additive Technologies**

Pokyny pro vypracování:

1. Popis spojitosti napojení.
2. Vliv stupně spojitosti na pohledové vlastnosti plochy.
3. Možnosti využití aditivních technologií a postprocessingu pro výrobu pohledových ploch.
4. Výroba modelů jednotlivých stupňů spojitosti.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


**Ing. Lukáš Pelikán, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**


Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Lukáš Pelikán  
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

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání

Kahoun Hejhalová

Podpis studentky

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s využitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne 26.7.2020

Kateřina Hyšková

Podpis

**Poděkování:**

Děkuji panu Ing. Lukášovi Pelikánovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena na aditivní technologie. Zabývá se návrhem vzorků s různou spojitostí a jejich vytištěním na 3D tiskárnách. Zejména jsou zde řešeny možnosti úpravy těchto vzorků po vytištění, tak aby se docílilo zkvalitnění povrchu. Tento postprocessing je zde nejen popsán ale i prakticky ukázán. Práce je zakončena vyhodnocením použitých metod 3D tisku a vyhodnocením použitých metod úprav vzorků.

**Klíčová slova:** aditivní technologie, 3D tisk, spojitost křivek a ploch, postprocessing

## **Annotation**

This thesis is focused on additive technologies. It deals with the design of samples with different continuity and their printing on 3D printers. In particular it deals with the possibility of finishing these samples after printing, to achieve an improvement of the surface. This postprocessing is not only described here but also practically shown. The work ends with the evaluation of the used methods of 3D printing and evaluation of the methods used to edit samples.

**Keywords:** additive technologies, 3D printing, the connection of curves and surfaces, postprocessing

# Obsah

|  |        |
|--|--------|
| Anotace .....  | - 5 -  |
| Úvod.....  | - 8 -  |
| 1 Definice a vlastnosti křivek a ploch.....  | - 9 -  |
| 1.1 Spojitost křivek a ploch.....  | - 12 - |
| 1.1.1 Parametrická spojitost.....  | - 12 - |
| 1.1.2 Geometrická spojitost .....  | - 13 - |
| 1.2 Metody analýzy spojitosti napojení .....   | - 14 - |
| 1.2.1 Graf křivosti.....   | - 14 - |
| 1.2.2 Zebra analýza.....   | - 15 - |
| 2 Návrh křivek a ploch.....  | - 18 - |
| 2.1 Návrhy dvou křivek s geometrickými spojitostmi .....   | - 18 - |
| 2.1.1 Návrh dvou křivek se spojitostí G0 .....   | - 18 - |
| 2.1.2 Návrh dvou křivek se spojitostí G1 .....   | - 20 - |
| 2.1.3 Návrh dvou křivek se spojitostí G2 .....   | - 21 - |
| 2.2 Návrh dvou ploch s parametrickými spojitostmi .....  | - 23 - |
| 2.2.1 Návrh dvou ploch se spojitostí C0.....   | - 24 - |
| 2.2.2 Návrh dvou ploch se spojitostí C1 .....  | - 25 - |
| 2.2.3 Návrh dvou ploch se spojitostí C2.....   | - 27 - |
| 3 Návrh vzorků a přípravku .....   | - 28 - |
| 4 3D tisk – dostupné technologie a vhodné metody zkvalitnění povrchu s ohledem na materiál ..... | - 31 - |
| 4.1 FDM metoda 3D tisku.....   | - 31 - |
| 4.1.1 Stratasys F370.....  | - 32 - |
| 4.1.2 Ultimaker 3 .....  | - 33 - |
| 4.2 SLA metoda 3D tisku.....   | - 34 - |

|       |  |      |
|-------|--|------|
| 4.2.1 | Formlabs Form 3.....                                       | 35 - |
| 4.3   | Úprava výtisků z FDM tiskárny.....                         | 36 - |
| 4.3.1 | Mechanické úpravy.....                                     | 36 - |
| 4.3.2 | Chemické úpravy.....                                       | 38 - |
| 4.4   | Úprava výtisků z SLA tiskárny.....                         | 39 - |
| 5     | Příprava tisku, tisk vzorků a dílů.....                    | 40 - |
| 5.1   | Vzorky se spojitostí G0 a G1.....                          | 41 - |
| 5.2   | Vzorky se spojitostí G2 a C0.....                          | 42 - |
| 5.3   | Vzorky se spojitostí C1 a C2.....                          | 45 - |
| 5.4   | Upínací díly.....  | 48 - |
| 6     | Postupy zkvalitňování povrchů vzorků (Postprocessing)..... | 48 - |
| 6.1   | Zpracování vzorků se spojitostí G1 a C0.....               | 49 - |
| 6.1.1 | Vzorek se spojitostí G1.....                               | 50 - |
| 6.1.2 | Vzorek se spojitostí C0.....                               | 53 - |
| 6.2   | Zpracování vzorků se spojitostí G0 a G2.....               | 57 - |
| 6.3   | Zpracování vzorku se spojitostí C2.....                    | 62 - |
| 7     | Výroba přípravku.....                                      | 65 - |
| 8     | Vyhodnocení 3D tisku a metod úprav vzorků.....             | 68 - |
| 8.1   | Cena tiskáren FDM x SLA.....                               | 68 - |
| 8.2   | Cena materiálů pro FDM x SLA tisk.....                     | 68 - |
| 8.3   | Kvalita výtisků z FDM x SLA tiskárny.....                  | 69 - |
| 8.4   | Chemické úpravy x mechanické úpravy vzorků.....            | 71 - |
|       | Závěr.....   | 72 - |
|       | Seznam použité literatury a zdrojů.....                    | 73 - |
|       | Seznam obrázků, tabulek a příloh.....                      | 76 - |

# Úvod

Aditivní technologie v posledních letech nabírají na všeobecném zájmu i v širší společnosti. Zejména pokud se bavíme o 3D tisku plastů, který zažívá velký boom.

V dnešní době velká část firem investovala do 3D tiskáren zejména pokud se orientuje na vývoj svých produktů, nebo pro výrobu přípravků. Firmy zjistili, že rychlost i flexibilita, kterou 3D tisk přináší při vývoji produktů, jim finančně navrátí jejich investice. [13, 16, 14]

V případě domácího využití 3D tiskáren se tento vývoj velmi podobá. Do domácnosti si 3D tiskárnu může totiž dovést v podstatě úplně každý. Není ani nutné, aby měl software na tvorbu dílů. Na internetu existují volně dostupné hotové díly, které si může každý, většinou zadarmo, stáhnout a vytisknout. [13, 16]

S tímto pokrokem se také začala více řešit otázka následné úpravy výtisků, aby bylo dosaženo kvalitního a dobře vypadajícího povrchu výtisku. To je možné dosáhnout buď samotnou kvalitou tisku, ale i následnou mechanickou, či chemickou úpravou. [13, 14]

Cílem této práce je vytvořit přípravek se vzorky, které budou reprezentovat různé typy napojení křivek a ploch. Vzorky jsou tisknuté na 3D tiskárnách z různých materiálů a různými technologiemi 3D tisku plastů. Cílem je vyzkoušet experimentálně tyto vzorky upravit tak, abychom získali kvalitní plochy s velmi dobrou odrazivostí světla a bylo možné pozorovat lom světla na různých typech napojení křivek a ploch. Zároveň tak i zhodnotit odlišné postupy úpravy z několika hledisek.

Zároveň jsou v práci vysvětleny různé typy napojení – jak geometrické, tak i parametrické, nejen definicí, ale i konstrukce těchto typů napojení na daných příkladech.

Hotový přípravek bude následně darován Ústavu technické matematiky ČVUT.



# 1 Definice a vlastnosti křivek a ploch

Během navrhování různých konstrukčních celků se velmi často řeší napojování křivek, popř. ploch. Napojení je důležité nejen pro funkční tvary (například pro potrubí, kde má proudit tekutina, z důvodu zachování laminárního proudění), ale velmi často se řeší i z estetického hlediska (například lom světla na pohledových plochách výrobků). S napojením křivek se objevuje termín spojitost křivek a ploch. Velmi často se spojitost řeší v automobilovém průmyslu, například na karoseriích. [1, 2]

Pro uvedení do problematiky spojitosti křivek a ploch je vhodné nejprve uvést definici křivky a plochy, posléze i definice spojitosti. Uvedeny jsou i další potřebné definice a termíny pro úplnost.

## **Definice: Křivka [1]**

Křivka je každá souvislá podmnožina  $\kappa$  prostoru  $R^n$ , která je spojitým obrazem intervalu  $I$ . V případě, že  $n = 2$ , resp.  $n = 3$  označujeme křivku jako rovinou, resp. prostorovou.

Je-li analytickou reprezentací rovinné, resp. prostorové křivky vektorová funkce, která je definovaná, spojitá a alespoň jedenkrát diferencovatelná na intervalu  $I$ , říkáme, že je rovinná, resp. prostorová křivka dána vektorovou rovnicí

$$\mathbf{P}(t) = (x(t), y(t)), t \in I, \text{ resp. } \mathbf{P}(t) = (x(t), y(t), z(t)), t \in I.$$

## **Definice: Plocha [1]**

Plocha je každá souvislá podmnožina  $\kappa$  prostoru  $R^3$ , která je spojitým obrazem souvislé oblasti  $I \subset R^2$ . Je-li analytickou reprezentací plochy vektorová funkce  $\mathbf{F}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ , která je definovaná, spojitá a alespoň jedenkrát diferencovatelná na oblasti  $I$ , říkáme, že je plocha dána vektorovou rovnicí

$$\mathbf{P}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)), (u, v) \in I.$$

Je-li oblast  $I$  obdélníková a uzavřená, tedy  $I = [a, b] \times [c, d]$ , hovoříme o plátu.

## **Definice: Regulární a singulární bod křivky [1]**

Bod křivky  $\mathbf{P}(\alpha)$ ,  $\alpha \in [a, b]$ , nazýváme regulárním, jestliže vektor  $\mathbf{P}'(\alpha) = (x'(\alpha), y'(\alpha), z'(\alpha))$  je nenulový a odpovídá-li mu jen jedna hodnota parametru  $t = \alpha$  z  $(a, b)$ . Každý jiný bod nazýváme singulárním bodem křivky. Splývající počáteční a koncový bod křivky není považován za singulární.

**Definice: Tečný vektor, vektor binormály a vektor hlavní normály v bodě křivky [1]**

Derivace vektorové funkce

$$\mathbf{P}'(t) = \left( \frac{dx(t)}{dt}, \frac{dy(t)}{dt}, \frac{dz(t)}{dt} \right) = (x'(t), y'(t), z'(t)), t \in [a, b]$$

je vektorová funkce, která vyjadřuje pro  $\alpha \in [a, b]$  tečný vektor křivky  $\mathbf{P}(t)$  v jejím bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ :

$$\mathbf{P}'(\alpha) = (x'(\alpha), y'(\alpha), z'(\alpha)).$$

Orientace tečného vektoru je shodná s orientací křivky. Jednotkový tečný vektor  $\mathbf{t}(\alpha)$  v regulárním bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$  křivky  $\mathbf{P}(t)$  je dán

$$\mathbf{t}(\alpha) = \frac{\mathbf{P}'(\alpha)}{|\mathbf{P}'(\alpha)|}.$$

Přímka určená bodem  $\mathbf{P}(\alpha)$  a směrovým vektorem  $\mathbf{t}(\alpha)$  se nazývá tečna  $t_\alpha$  křivky  $\mathbf{P}(t)$  v jejím bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ .

Vektorový součin první a druhé derivace vektorové funkce křivky  $\mathbf{P}(t)$ ,  $t \in [a, b]$  v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ ,  $\alpha \in [a, b]$ , se nazývá vektor binormály. Jednotkový vektor binormály  $\mathbf{b}(\alpha)$  je dán

$$\mathbf{b}(\alpha) = \frac{\mathbf{P}'(\alpha) \times \mathbf{P}''(\alpha)}{|\mathbf{P}'(\alpha) \times \mathbf{P}''(\alpha)|}.$$

Přímka určená bodem  $\mathbf{P}(\alpha)$  a směrovým vektorem  $\mathbf{b}(\alpha)$  se nazývá binormála  $b_\alpha$  křivky  $\mathbf{P}(t)$  v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ .

Vektorový součin vektoru binormály a tečného vektoru křivky  $\mathbf{P}(t)$ ,  $t \in [a, b]$ , v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ ,  $\alpha \in [a, b]$ , se nazývá vektor hlavní normály. Jednotkový vektor hlavní normály  $\mathbf{n}(\alpha)$  je dán

$$\mathbf{n}(\alpha) = \mathbf{b}(\alpha) \times \mathbf{t}(\alpha).$$

Přímka určená bodem  $\mathbf{P}(\alpha)$  a směrovým vektorem  $\mathbf{n}(\alpha)$  se nazývá hlavní normála  $n_\alpha$  křivky  $\mathbf{P}(t)$  v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ .

**Definice: Normálová, rektifikační a oskulační rovina [1]**

Rovina určená hlavní normálou a binormálou v regulárním bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ ,  $\alpha \in [a, b]$  křivky  $\mathbf{P}(t)$ ,  $t \in [a, b]$ , se nazývá normálová rovina  $\nu_\alpha$ . Rovina určená binormálou a tečnou v regulárním bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ ,  $\alpha \in I$  křivky  $\mathbf{P}(t)$ ,  $t \in [a, b]$ , se nazývá rektifikační rovina  $\rho_\alpha$ . Rovina určená tečnou a hlavní normálou v regulárním bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ ,  $\alpha \in [a, b]$  křivky  $\mathbf{P}(t)$ ,  $t \in [a, b]$ , se nazývá oskulační rovina  $\omega_\alpha$ .

**Definice: První křivost křivky [1]**

První křivost  ${}^1k(\alpha)$  v regulárním bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ ,  $\alpha \in [a, b]$ , křivky  $\mathbf{P}(t)$ ,  $t \in [a, b]$ , je nezáporné číslo

$${}^1k(\alpha) = \frac{|\mathbf{P}'(\alpha) \times \mathbf{P}''(\alpha)|}{|\mathbf{P}'(\alpha)|^3},$$

kde  $|\mathbf{P}'(\alpha) \times \mathbf{P}''(\alpha)|$  je velikost vektorového součinu první a druhé derivace křivky a  $|\mathbf{P}'(\alpha)|$  je velikost tečného vektoru křivky v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ . Číslo

$$r(\alpha) = \frac{1}{{}^1k(\alpha)}$$

nazýváme poloměrem křivosti v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ . Bod  $\mathbf{S}(\alpha) = \mathbf{P}(\alpha) + r(\alpha)\mathbf{n}(\alpha)$  ležící v oskulační rovině  $\omega_\alpha$  na polopřímce určené bodem  $\mathbf{P}(\alpha)$  a vektorem  $\mathbf{n}(\alpha)$  ve vzdálenosti  $r(\alpha)$  od bodu  $\mathbf{P}(\alpha)$  se nazývá střed křivosti v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ . Kružnice se středem v bodě  $\mathbf{S}(\alpha)$  a poloměrem  $r(\alpha)$  se nazývá oskulační kružnice v bodě  $\mathbf{P}(\alpha)$ .

Platí-li  ${}^1k(t)=0$ ,  $t \in [a, b]$ , je křivka  $\mathbf{P}(t)$  přímka.

**Definice: Tečné vektory parametrických křivek plochy [1]**

Parciální derivace vektorové funkce

$$\mathbf{P}^u(u, v) = \frac{\partial \mathbf{P}(u, v)}{\partial u} = (x^u(u, v), y^u(u, v), z^u(u, v)), (u, v) \in I,$$

resp.

$$\mathbf{P}^v(u, v) = \frac{\partial \mathbf{P}(u, v)}{\partial v} = (x^v(u, v), y^v(u, v), z^v(u, v)), (u, v) \in I,$$

je vektorová funkce, která určuje pro  $(\alpha, \beta) \in I$  tečný vektor parametrické  $u$ -křivky  $\mathbf{P}^u(u, v)$ , resp. tečný vektor parametrické  $v$ -křivky  $\mathbf{P}^v(u, v)$  v jejím bodě  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$ :

$$\mathbf{P}^u(\alpha, \beta) = \left. \frac{\partial \mathbf{P}(u, v)}{\partial u} \right|_{u=\alpha, v=\beta} = (x^u(\alpha, \beta), y^u(\alpha, \beta), z^u(\alpha, \beta)),$$

resp.

$$\mathbf{P}^v(\alpha, \beta) = \left. \frac{\partial \mathbf{P}(u, v)}{\partial v} \right|_{u=\alpha, v=\beta} = (x^v(\alpha, \beta), y^v(\alpha, \beta), z^v(\alpha, \beta)).$$

Orientace tečných vektorů parametrických křivek je shodná s orientací příslušné parametrické křivky. Bodem  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$  a tečným vektorem  $\mathbf{P}^u(\alpha, \beta)$ , resp.  $\mathbf{P}^v(\alpha, \beta)$  je určena tečna k parametrické  $u$ -, resp.  $v$ -křivce.

**Definice: Tečná rovina a normála v bodě plochy [1]**

Rovina  $\tau_{\alpha,\beta}$  určená tečnými vektory parametrických křivek  $\mathbf{P}^u(\alpha, \beta)$ , resp.  $\mathbf{P}^v(\alpha, \beta)$  v regulárním bodě  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$ ,  $(\alpha, \beta) \in I$ , se nazývá tečná rovina plochy v bodě  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$ .  
Vektor

$$\mathbf{n}(\alpha, \beta) = \mathbf{P}^u(\alpha, \beta) \times \mathbf{P}^v(\alpha, \beta)$$

v regulárním bodě  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$  se nazývá vektor normály plochy v bodě  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$ . Přímka určená bodem  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$  a vektorem normály  $\mathbf{n}(\alpha, \beta)$  se nazývá normála plochy v bodě  $\mathbf{P}(\alpha, \beta)$ .

## 1.1 Spojitost křivek a ploch

Spojitosť napojení křivek a ploch rozeznáváme dvojího druhu: parametrickou spojitost a geometrickou spojitost křivek a ploch. V úvodu jsou uvedené definice spojitosti křivky a plochy. Následují definice pro oba dva druhy spojitosti křivek a ploch. [1]

**Definice: Spojitost křivky [1]**

Křivka  $\mathbf{P}(t)$ ,  $t \in [a, b]$ , má spojitost  $k$ -tého řádu na  $[a, b]$ , právě když má její vektorová funkce na  $[a, b]$  spojitost  $k$ -tého řádu. O takové křivce říkáme, že je  $C^k$  spojitá na  $[a, b]$ .

**Definice: Spojitost plochy [1]**

Plocha  $\mathbf{P}(u, v)$ ,  $(u, v) \in I$ , má spojitost  $k$ -tého řádu v bodě  $(\alpha, \beta) \in I$ , právě když má její vektorová funkce v tomto bodě spojitost  $k$ -tého řádu. O takové ploše říkáme, že je  $C^k$  spojitá v bodě  $(\alpha, \beta)$ .

Jestliže má plocha  $\mathbf{P}(u, v)$ ,  $(u, v) \in I$  spojitost  $k$ -tého řádu ve všech bodech z oblasti  $I$ , říkáme, že je  $C^k$  spojitá na oblasti  $I$ .

### 1.1.1 Parametrická spojitost

**Definice: Parametrická spojitost napojení dvou křivek [1]**

Nechť je dána křivka  $\mathbf{P}(t)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{P}(t) = (x(t), y(t), z(t))$ ,  $t \in [a, b]$ , jejíž souřadnicové funkce jsou  $C^k$  spojitě na  $[a, b]$ . Nechť je dále dána křivka  $\mathbf{R}(s)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{R}(s) = (\tilde{x}(s), \tilde{y}(s), \tilde{z}(s))$ ,  $s \in [c, d]$ , jejíž souřadnicové funkce jsou  $C^k$  spojitě na  $[c, d]$ . Říkáme, že křivka  $\mathbf{R}(s)$  je napojena svým počátečním bodem na koncový bod křivky  $\mathbf{P}(t)$  s  $C^k$  spojitostí, popř. že jsou tyto křivky  $C^k$  spojitě napojeny, jestliže platí

$$\mathbf{P}^{(i)}(b) = \mathbf{R}^{(i)}(c), i = 0, 1, \dots, k.$$

Takto definovaná spojitost napojení dvou křivek se označuje jako parametrická spojitost  $k$ -tého řádu.

Parametrická spojitost  $C^k$  vyjadřuje, že v bodě napojení dvou křivek jsou totožné vektory prvních  $k$  derivací obou křivek, tj. jejich počátek (bod napojení), směr, orientace i velikost.

**Definice: Parametrická spojitost napojení dvou plátů [1]**

Nechť je dán plát  $\mathbf{P}(u, v)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{P}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ ,  $(u, v) \in [0, 1]^2$ , jejíž souřadnicové funkce jsou spojitě a  $k$  krát spojitě diferencovatelné na  $[0, 1]^2$ . Nechť je dále dán plát  $\mathbf{R}(s, t)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{R}(s, t) = (\tilde{x}(s, t), \tilde{y}(s, t), \tilde{z}(s, t))$ ,  $(s, t) \in [0, 1]^2$ , jejíž souřadnicové funkce jsou spojitě a  $k$  krát spojitě diferencovatelné na  $[0, 1]^2$ .

Říkáme, že plát  $\mathbf{R}(s, t)$  je napojen svým okrajem  $\mathbf{R}(0, t)$  na okraj  $\mathbf{P}(1, v)$  plátu  $\mathbf{P}(u, v)$  s  $C^k$  parametrickou spojitostí, popř. že jsou tyto pláty  $C^k$  spojitě napojeny, jestliže jsou si rovny vektory prvních  $k$  parciálních derivací vektorových funkcí plátu  $\mathbf{P}(u, v)$  a plátu  $\mathbf{R}(s, t)$  podél okrajů  $\mathbf{P}(1, v)$  a  $\mathbf{R}(0, t)$ .

Méně přísné požadavky na napojení klade tzv. geometrická spojitost.

**1.1.2 Geometrická spojitost**

**Definice: Geometrická spojitost napojení dvou křivek [1]**

Nechť je dána křivka  $\mathbf{P}(t)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{P}(t) = (x(t), y(t), z(t))$ ,  $t \in [a, b]$ , jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně  $C^1$ , resp.  $C^2$  spojitě na  $[a, b]$ . Nechť je dále dána křivka  $\mathbf{R}(s)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{R}(s) = (\tilde{x}(s), \tilde{y}(s), \tilde{z}(s))$ ,  $s \in [c, d]$ , jejíž souřadnicové funkce jsou nejméně  $C^1$ , resp.  $C^2$  spojitě na  $[c, d]$ . Říkáme, že křivka  $\mathbf{R}(s)$  je napojena svým počátečním bodem na koncový bod křivky  $\mathbf{P}(t)$  s  $G^1$ , resp. s  $G^2$  spojitostí, popř. že jsou tyto křivky  $G^1$ , resp.  $G^2$  spojitě napojeny, jestliže platí

$$\mathbf{P}'(b) = \lambda \cdot \mathbf{R}'(c), \lambda \in R.$$

resp.

$${}^1k_{\mathbf{P}}(b) = {}^1k_{\mathbf{R}}(c),$$

kde  ${}^1k_{\mathbf{P}}(b)$ , resp.  ${}^1k_{\mathbf{R}}(c)$  je první křivost křivky  $\mathbf{P}(t)$ , resp.  $\mathbf{R}(s)$  v bodě napojení. Takto definovaná spojitost napojení dvou křivek se označuje jako geometrická spojitost 1., resp. 2. řádu.

Vzhledem k tomu, že tečný vektor  $\mathbf{R}'(c)$  je  $\lambda$ -násobkem tečného vektoru  $\mathbf{P}'(b)$ , mají  $G^1$  spojitě napojené křivky totožnou tečnu v bodě napojení.  $G^2$  spojitě napojené křivky mají v bodě napojení totožnou první křivost, tj. totožnou oskulační kružnici.

**Definice: Geometrická spojitost napojení dvou plátů [1]**

Nechť je dán plát  $\mathbf{P}(u, v)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{P}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ ,  $(u, v) \in [0, 1]^2$ , jejíž souřadnicové funkce jsou spojitě a nejméně jednou, resp. dvakrát spojitě diferencovatelné na  $[0, 1]^2$ . Nechť je dále dán plát  $\mathbf{R}(s, t)$  vektorovou rovnicí  $\mathbf{R}(s, t) = (\tilde{x}(s, t), \tilde{y}(s, t), \tilde{z}(s, t))$ ,  $(s, t) \in [0, 1]^2$ , jejíž souřadnicové funkce jsou spojitě a nejméně jednou, resp. dvakrát spojitě diferencovatelné na  $[0, 1]^2$ .

Říkáme, že plát  $\mathbf{R}(s, t)$  je napojen svým okrajem  $\mathbf{R}(0, t)$  na okraj  $\mathbf{P}(1, v)$  plátu  $\mathbf{P}(u, v)$  s  $G^1$ , resp.  $G^2$  geometrickou spojitostí, popř., že jsou tyto pláty  $G^1$ , resp.  $G^2$  spojitě napojeny, jestliže jsou totožné tečné roviny obou plátů, resp. jsou si rovny první křivosti parametrických křivek obou plátů podél okrajů  $\mathbf{P}(1, v)$  a  $\mathbf{R}(0, t)$ .

Spojitost křivek a ploch (ať už parametrickou, nebo geometrickou) budeme v této práci řešit nejvýše 2. řádu.

## 1.2 Metody analýzy spojitosti napojení

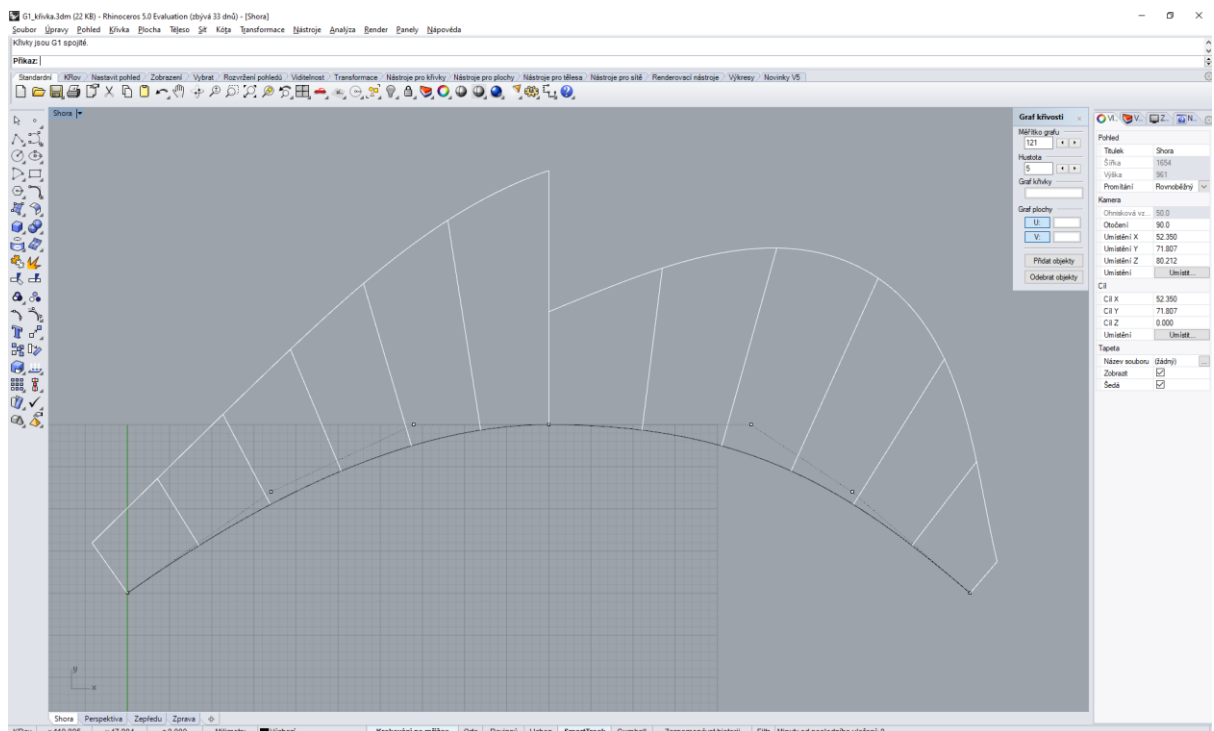
Při kontrole spojitosti křivek a ploch je klíčové, aby byla možnost použít vhodné nástroje analýzy spojitosti napojení. V dnešní době toto umožňují v podstatě všechny softwarové aplikace, kde pracujeme s křivkami, popřípadě s plochami, jako jsou například CAD (computer aided design) softwary.

Zde jsou uvedeny pouze dvě metody, které byly využity v této práci.

### 1.2.1 Graf křivosti

Graf křivosti, nebo také analýza křivosti, představuje analýzu křivek a ploch, kdy můžeme pomocí geometrického vykreslení analyzovat průběhy křivek a ploch, ale především i napojení dvou křivek, popřípadě ploch. Graf křivosti vykresluje spojnicí koncových bodů normálových úseček dané křivky. Velikost normálových úseček závisí na první křivosti křivky. V případě ploch se graf křivosti řeší v několika řezech (na okrajových křivkách a izočárách) dané plochy, hlavně dle nastavení parametrů analýzy. [2, 3, 4, 5]

Při navázání dvou křivek jsme schopni z grafu křivosti rozlišit základní typy geometrické spojitosti napojení dvou křivek. Tato problematika je více rozebrána v následující kapitole.

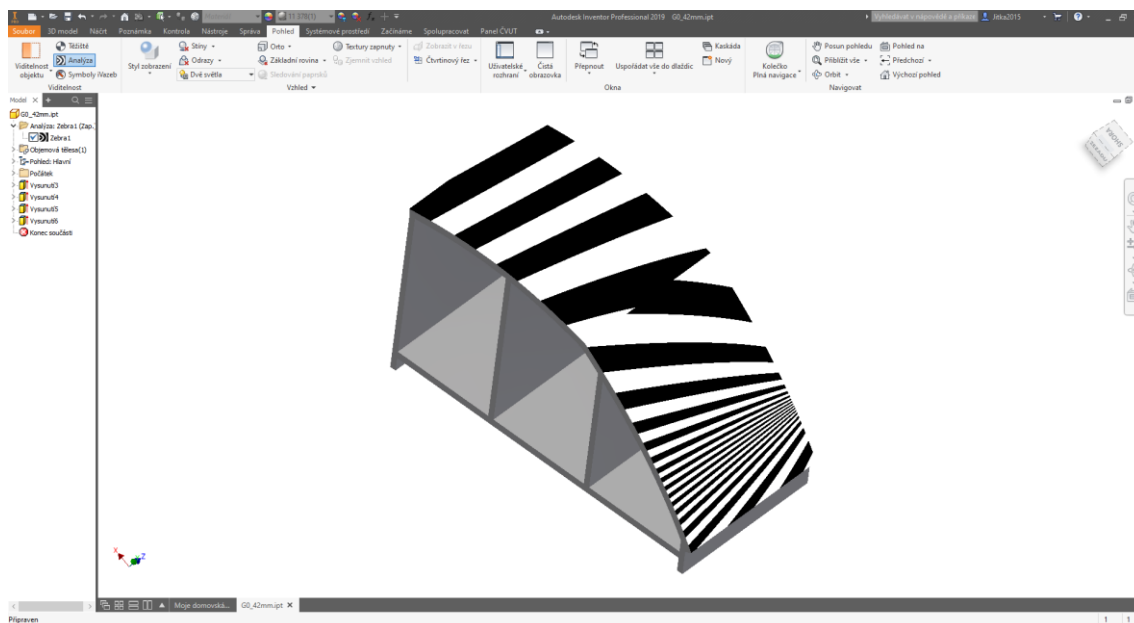


Obrázek 1: Ukázka grafu křivosti, konkrétně křivky G1 spojitě napojené

Na obrázku je ukázka ze softwaru Rhinoceros 5, kde jsem použila analýzy grafem křivosti na spojení dvou křivek. Graf křivosti se může libovolně upravit dle potřeby. Konkrétně zde máme možnost nastavit měřítko grafu a hustotu. Hustota představuje, kolik normálových úseček se nám na křivce vykreslí. Měřítko grafu zase to, jak moc se nám tyto normálové úsečky zvětší, popř. zmenší. V pravé části obrázku je okénko, kde toto nastavení lze realizovat. Zde konkrétně bylo zvolené nastavení takovéto: měřítko grafu 121, hustota 5.

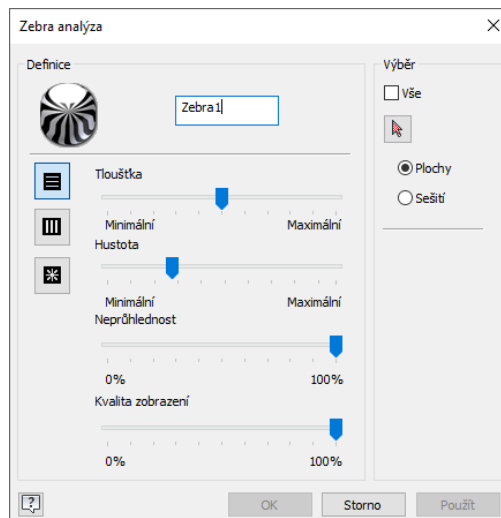
### 1.2.2 Zebra analýza

Metoda analýzy spojitosti napojení s názvem zebra analýza, nebo také analýza zebra pruhy, se využívá pro analýzu napojení ploch. Tato metoda spočívá v promítání rovnoběžek na vybraný model, nebo jen na vybraných plochách. Na modelu pak sledujeme kontinuitu těchto rovnoběžných pruhů v místě, kde se napojují dvě plochy. Kvalita (neboli kontinuita) tohoto napojení nám prozradí, jaký stupeň spojitosti je u konkrétních ploch. [6, 7]



Obrázek 2: Ukázka analýzy zebra, konkrétně na vzorku G0 spojitosti

Na obrázku je ukázka užití této analýzy na vybraných plochách v softwaru Autodesk Inventor Professional 2019. Jako u funkce grafu křivivosti máme i zde celou řadu možností, jak si analýzu upravit, abychom napojení mohli, co nejlépe vyhodnotit. Další obrázek ukazuje konkrétní nastavení v tomto případě.



Obrázek 3: Možnosti nastavení zebra analýzy

Tato metoda analýzy se využívá v automobilovém průmyslu. Kontroluje se tak stav exteriéru vozidla. Vůz je umístěn do takzvaného světelného tunelu, kde jsou pomocí rovnoběžných světelných zdrojů vytvořeny na vnějšku auta rovnoběžky pomocí odrazu. Pracovníci mohou vyhodnotit, zda odražené pruhy jsou kontinuální, nebo zda někde



na sebe navazují se zlomem, popřípadě nenasazují vůbec. Dají se tak odhalit defekty použitých plechů, například prohlubně. [8, 9]

Tato analýza se uplatňuje nejčastěji jako finální kontrola automobilu, ale například automobilka Porsche AG tuto kontrolu zařadila již po dokončení karoserie v průběhu montážní linky. [9]



*Obrázek 4: Ukázka analýzy zebra v automotive 1 [9]*



*Obrázek 5: Ukázka analýzy zebra v automotive 2 [10]*

## 2 Návrh křivek a ploch

Pro návrh křivek a ploch jsem použila software Rhinoceros 5, se kterým jsem měla možnost pracovat v rámci bakalářského studia na předmětu Počítačová grafika.

Počet navrhovaných vzorků je šest. Tři vzorky jsou představitele napojení dvou křivek s geometrickou spojitostí G0, G1 a G2. Zbylé tři vzorky jsou dvě plochy navázané s parametrickou spojitostí C0, C1 a C2.

### 2.1 Návrhy dvou křivek s geometrickými spojitostmi

Návrhy křivek jsem vytvořila v rovině xy, a to zejména kvůli následujícímu exportu do CAD softwaru, kde jsem zvyklá vytvářet počáteční návrhy dílů ve stejné rovině. Souřadnice z je pro všechny body 0.

Křivky jsou aproximačně dány řídicími body, jež jsem si zvolila vhodně, tak abych docílila požadované velikosti a splnila podmínky pro různé stupně geometrické spojitosti. Počet řídicích bodů pro jednu křivku jsou čtyři body.

Křivky se rozdělují na křivku 1 a křivku 2. Křivka 1 má vždy počáteční bod na souřadnici v xy [0, 50] a koncový bod vždy v xy [50, 70]. Křivka 2 má vždy počáteční bod na souřadnici v xy [50, 70] a koncový bod vždy v xy [100, 50].

Grafy křivosti použité pro vyhodnocení spojitosti napojení křivek mají jednotné nastavení měřítka grafu 121 a hustoty grafu 5, lze tak porovnat míru zakřivení mezi jednotlivými návrhy.

#### 2.1.1 Návrh dvou křivek se spojitostí G0

G0 spojitost, neboli také poziční spojitost, spočívá v tom, že koncový bod křivky 1 je společný pro počáteční bod křivky 2. V tomto bodě se mění směr tečen křivek. Toto je jediný požadavek pro geometrickou spojitost G0. [3]

Body křivky 1 v souřadnicích xy:

[0, 50]

[9, 56]

[25, 65]

[50, 70]

Body křivky 2 v souřadnicích xy:

[50, 70]

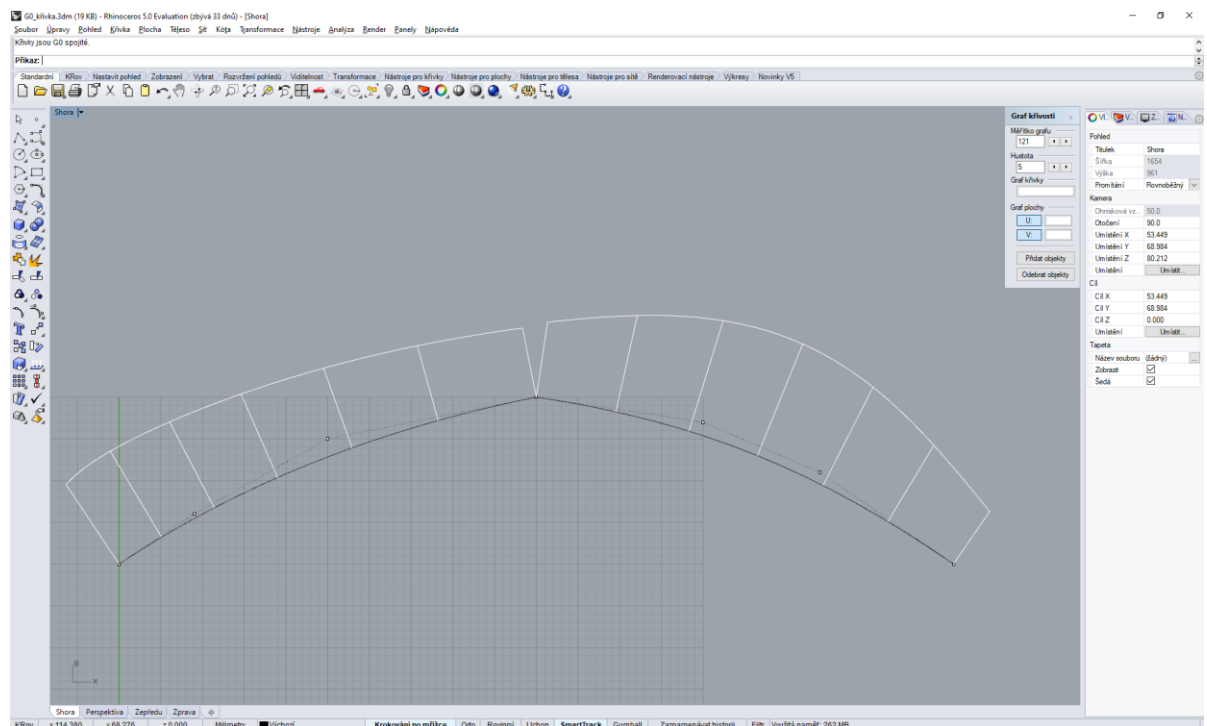
[70, 67]

[84, 61]

[100, 50]

Po zapnutí grafu křivosti pro obě dvě křivky můžeme vidět, že přechod mezi grafem křivosti křivky 1 a grafem křivosti křivky 2 není plynulý, ani na sebe nenavazuje. Je zde zlom, jenž je typický pro geometrickou spojitost G0.

Pro ověření, že se opravdu jedná o geometrickou spojitost G0, lze v softwaru Rhinoceros 5 využít nástroj Geometrická spojitost, který je k nalezení v kartě Analýza. Po použití funkce nám software vypíše v levém horním rohu, nad příkazovým řádkem, o jakou geometrickou spojitost se jedná. Zde se potvrdilo, že se jedná o spojitost G0.



Obrázek 6: G0 spojitost dvou křivek – graf křivosti

## 2.1.2 Návrh dvou křivek se spojitostí G1

G1 spojitost, neboli také tečná spojitost, spočívá v tom, že křivky mají v bodě dotyku souhlasně kolineární vektory tečen. Tečny obou jsou rovnoběžné, ale nemají stejnou velikost. Dále musí samozřejmě platit požadavek spojitosti pro G0, křivky musí mít společný bod. V tomto bodě se nemění směr tečen křivek, ale mění se rychlost a zrychlení. [3, 4, 11]

Body křivky 1 v souřadnicích xy:

[0, 50]

[17, 62]

[34, 70]

[50, 70]

Body křivky 2 v souřadnicích xy:

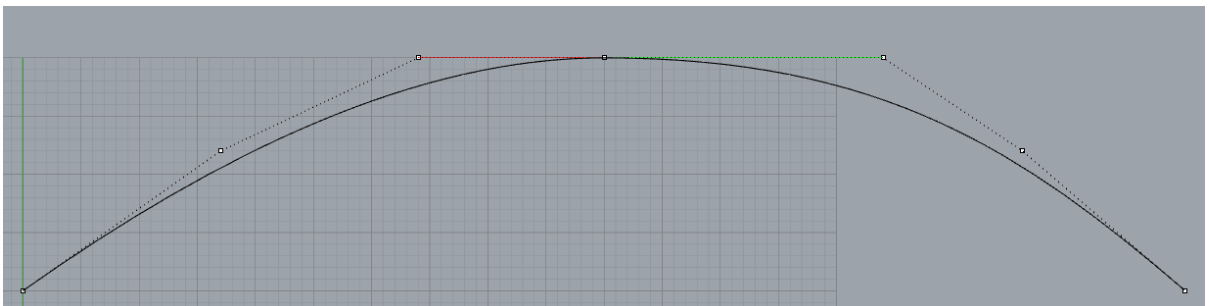
[50, 70]

[74, 70]

[86, 62]

[100, 50]

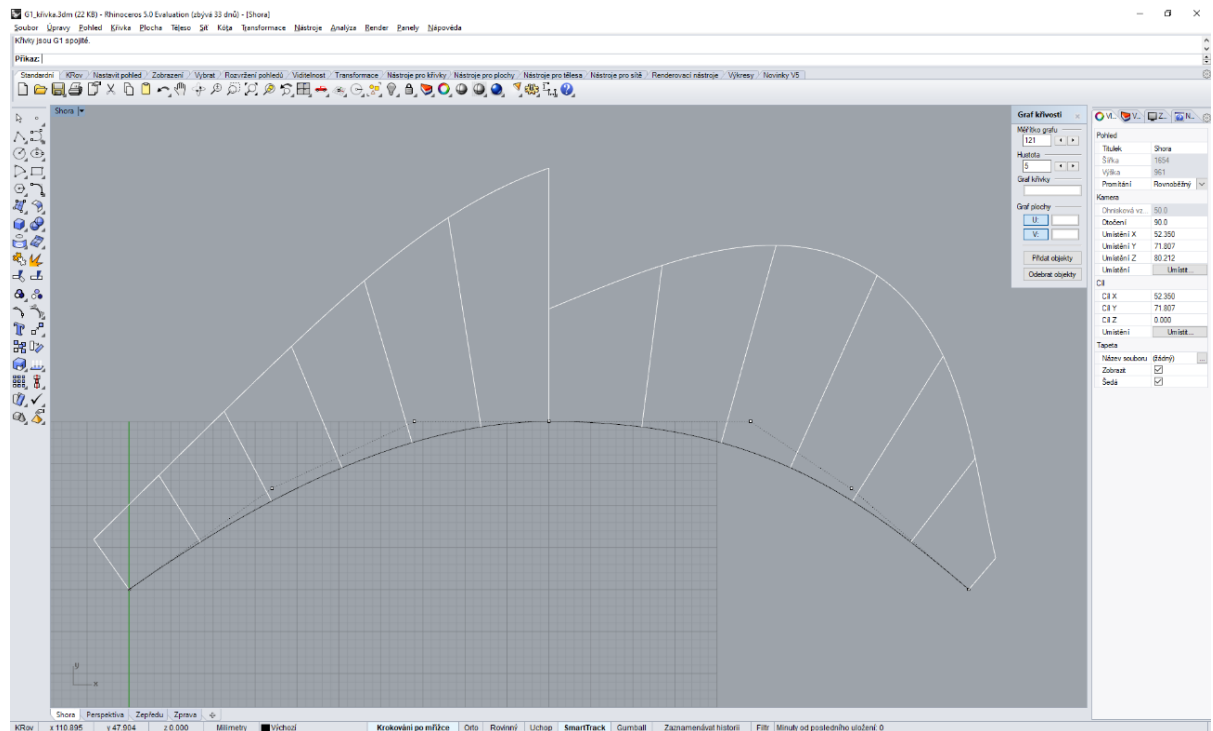
V praxi to znamená, že předposlední a poslední řídicí bod křivky 1 a první a druhý řídicí bod křivky 2 jsou na jedné přímce. Ovšem vzdálenost zmíněných řídicích bodů křivky 1 je jiná, než vzdálenost zmíněných řídicích bodů křivky 2. [4]



Obrázek 7: G1 spojitost dvou křivek

Po zapnutí grafu křivosti pro obě dvě křivky můžeme vidět, že přechod mezi grafem křivosti křivky 1 a grafem křivosti křivky 2 na sebe navazuje, ale nemá spojitý přechod. Graf křivosti křivky 1 a graf křivosti křivky 2 sdílejí přímkou u společného bodu.

Po použití nástroje Geometrická spojitost ověřit, že navržená křivka je opravdu G1 spojitě napojená. Zde se potvrdilo, že se jedná o spojitost G1.



Obrázek 8: G1 spojitost dvou křivek – graf křivosti

### 2.1.3 Návrh dvou křivek se spojitostí G2

G2 spojitost, neboli také křivostní spojitost, spočívá v tom, že křivky mají v bodě dotyku stejnou první křivost. V bodě dotyku křivek se nemění směr tečen, ani rychlost, ale zrychlení ano. Dále musí samozřejmě platit požadavek spojitosti pro G1. [3, 4, 11]

Body křivky 1 v souřadnicích xy:

[0, 50]

[17, 65]

[35, 70]

[50, 70]

Body křivky 2 v souřadnicích xy:

[50, 70]

[65, 70]

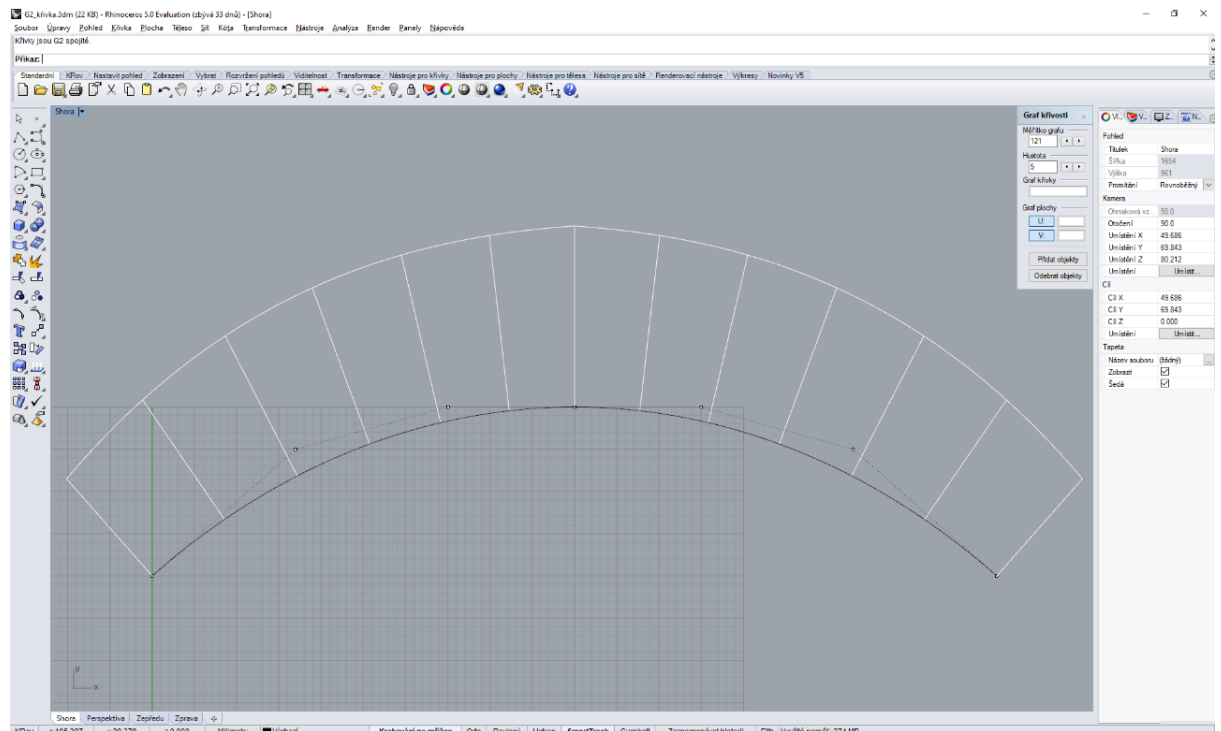
[83, 65]

[100, 50]

V praxi to znamená, že předposlední a poslední řídicí bod křivky 1 a první a druhý řídicí bod křivky 2 jsou na jedné přímce a zároveň vzdálenost zmíněných řídicích bodů křivky 1 je stejná jako vzdálenost zmíněných řídicích bodů křivky 2. [4]

Po zapnutí grafu křivosti pro obě dvě křivky můžeme vidět, že přechod mezi grafem křivosti křivky 1 a grafem křivosti křivky 2 je souvislý. Graf křivosti křivky 1 a graf křivosti křivky 2 u společného bodu mají konec a začátek ve stejném bodě.

Po použití nástroje Geometrická spojitost ověřit, že navržená křivka je opravdu G2 spojitě napojená. Zde se potvrdilo, že se jedná o spojitost G2.



Obrázek 9: G2 spojitost dvou křivek – graf křivosti

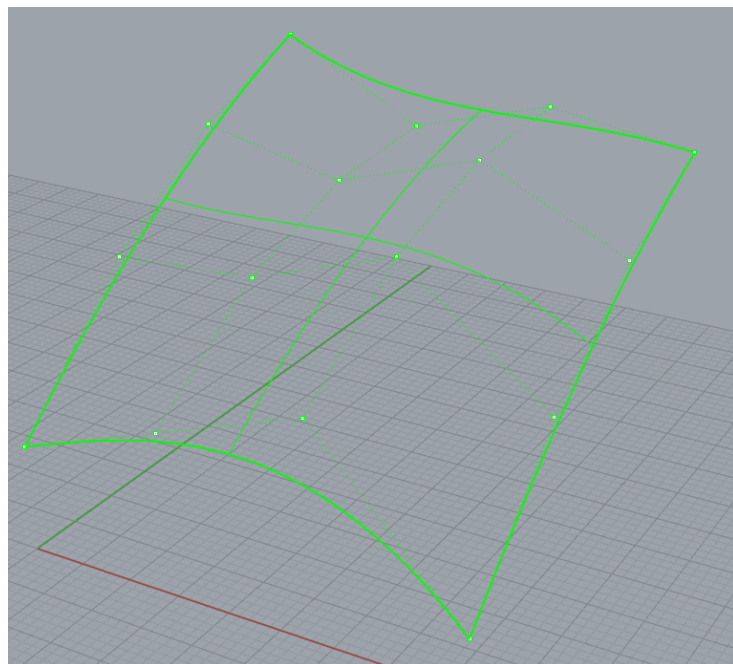
## 2.2 Návrh dvou ploch s parametrickými spojitostmi

Plochy se rozdělují na plochu základní a plochu 2. Plocha základní je pro všechny parametrické spojitosti stejná. Tuto plochu jsem vytvořila pomocí čtyř řídicích okrajových křivek, které byly definované těmito řídicími body v prostoru xyz:

| <b>P0(u)</b> | <b>P1(u)</b> |
|--------------|--------------|
| [0, 0, 10]   | [0, 42, 35]  |
| [14, 0, 15]  | [14, 42, 28] |
| [28, 0, 20]  | [28, 42, 32] |
| [42, 0, 5]   | [42, 42, 30] |

| <b>P0(v)</b> | <b>P1(v)</b> |
|--------------|--------------|
| [0, 0, 10]   | [42, 0, 5]   |
| [0,14, 22]   | [42, 14, 17] |
| [0, 28, 30]  | [42, 28, 25] |
| [0, 42, 35]  | [42, 42, 30] |

Těmito křivkami jsem proložila plochu. Vznikne plocha se 16 řídicími body.

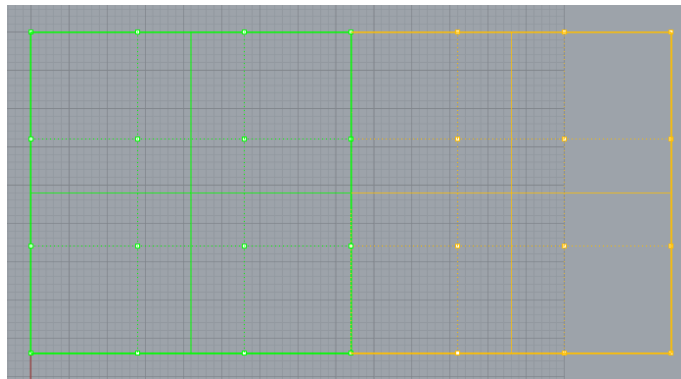


Obrázek 10: Základní plocha

### 2.2.1 Návrh dvou ploch se spojitostí C0

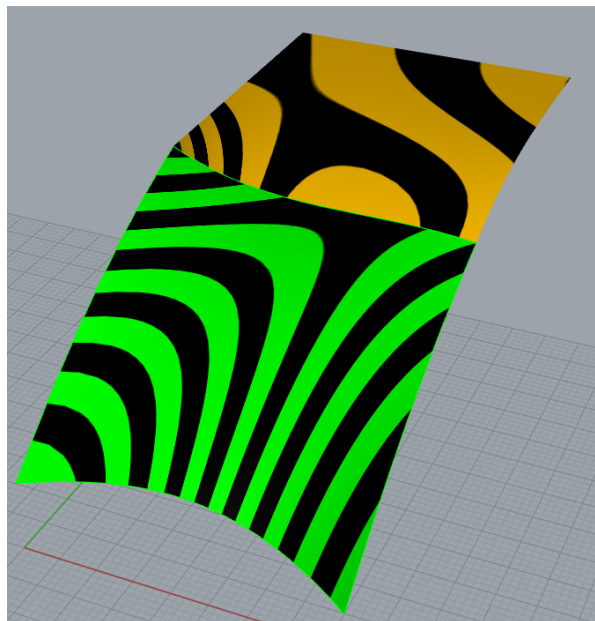
C0 spojitost ploch spočívá v tom, že plochy mají jednu společnou hranu, neboli řada posledních řídicích bodů základní plochy jsou totožné s první řadou řídicích bodů plochy 2. V případě C0 spojitosti se může měnit skokem směr pohybu, rychlost i zrychlení v bodech napojení. [3, 11]

Na zbylých řadách řídicích bodů křivky 2 nezáleží. Body, které se již nepodílejí na spojitosti, byly umístěny vždy v ose z na hodnotě 35 a v ostatních dvou souřadnicích xy, tak aby byla zachována čtvercová síť.



Obrázek 11: C0 spojitost napojení dvou ploch - síť řídicích bodů

Při využití analýzy zebra je vidět, že pruhy na sebe navenavazují spojitě. Na výrobcích, které by měly tuto spojitost napojení, by tento zlom byl patrný na první pohled. V případě lesklého povrchu, který by odrazil světlo, by se lom světla odhalil velmi snadno.



Obrázek 12: C0 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra

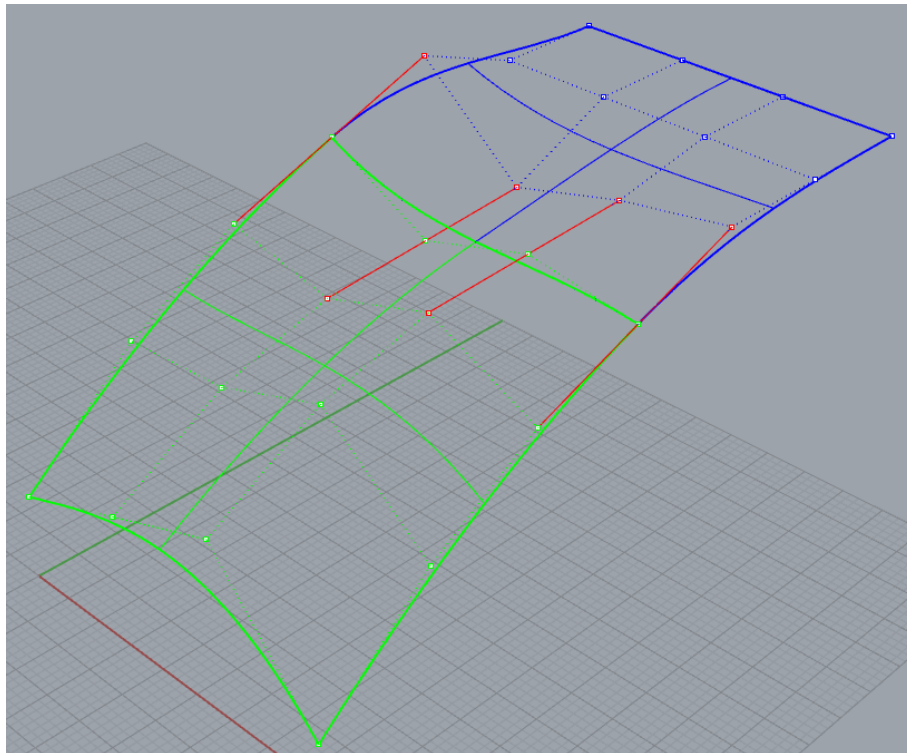


### 2.2.2 Návrh dvou ploch se spojitostí C1

C1 spojitost ploch spočívá v tom, že plochy mají totožné tečné vektory v bodech napojení (první derivace). V případě C1 spojitosti se může měnit skokem pouze zrychlení v bodech napojení. [3, 11]

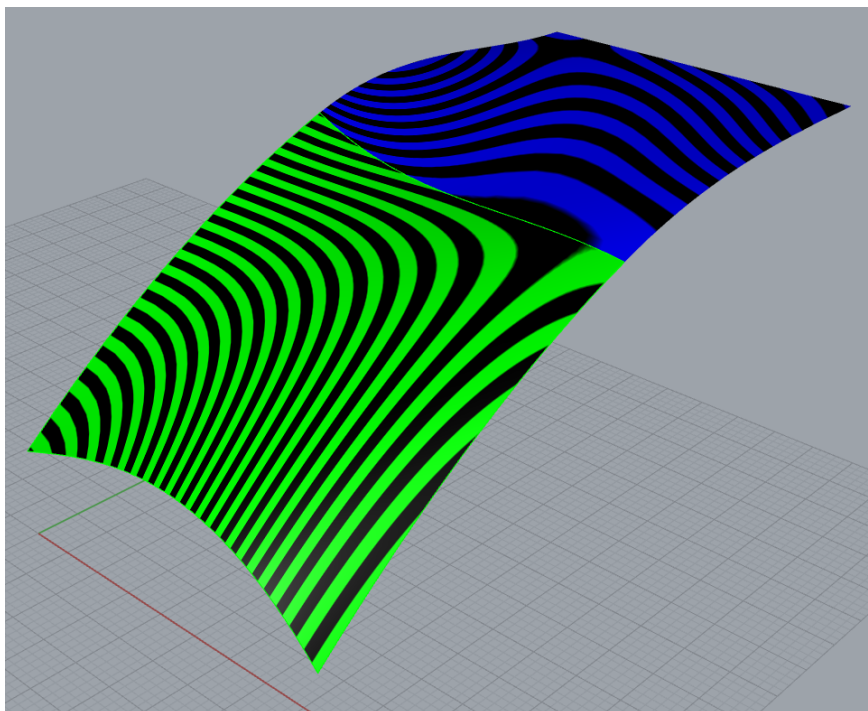
Předposlední a poslední řada řídicích bodů základní plochy musí být na stejné přímce jako první a druhá řada řídicích bodů plochy 2. Zároveň musí být vzdálenost zmíněných bodů u základní plochy stejná jako vzdálenost u zmíněných bodů plochy 2.

Na zbylých dvou řadách řídicích bodů křivky 2 nezáleží. Body, které se již nepodílejí na spojitosti, byly umístěny vždy v ose z na hodnotě 35 a v ostatních dvou souřadnicích xy, tak aby byla zachována čtvercová síť.

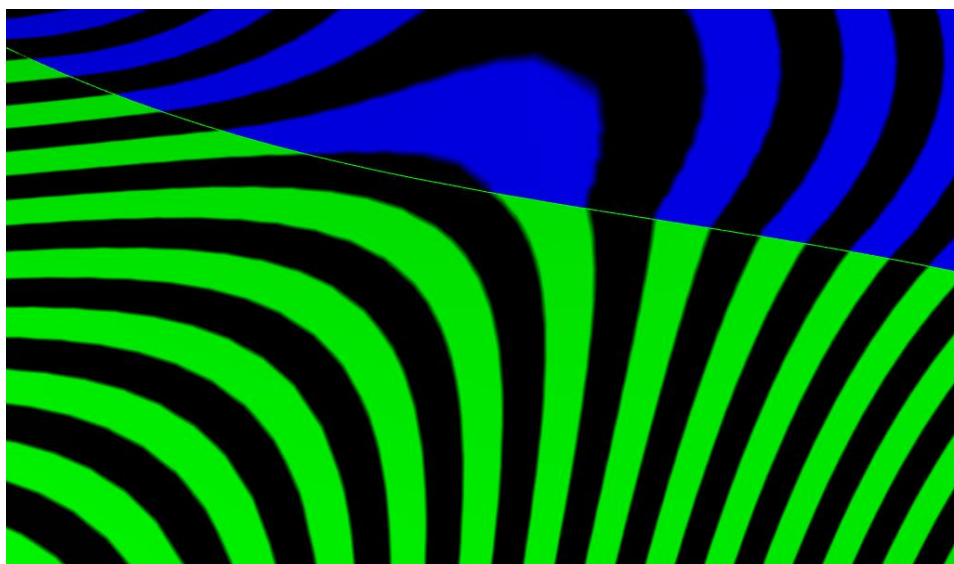


Obrázek 13: C1 spojitost napojení dvou ploch - síť řídicích bodů

Při využití analýzy zebra je vidět, že pruhy na sebe navazují, ale při přiblížení na detail je vidět, že v místě napojení ploch dochází k jemnému lomu. Na vysoce lesklých plochách by tento přechod byl patrný.



*Obrázek 14: C1 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra*



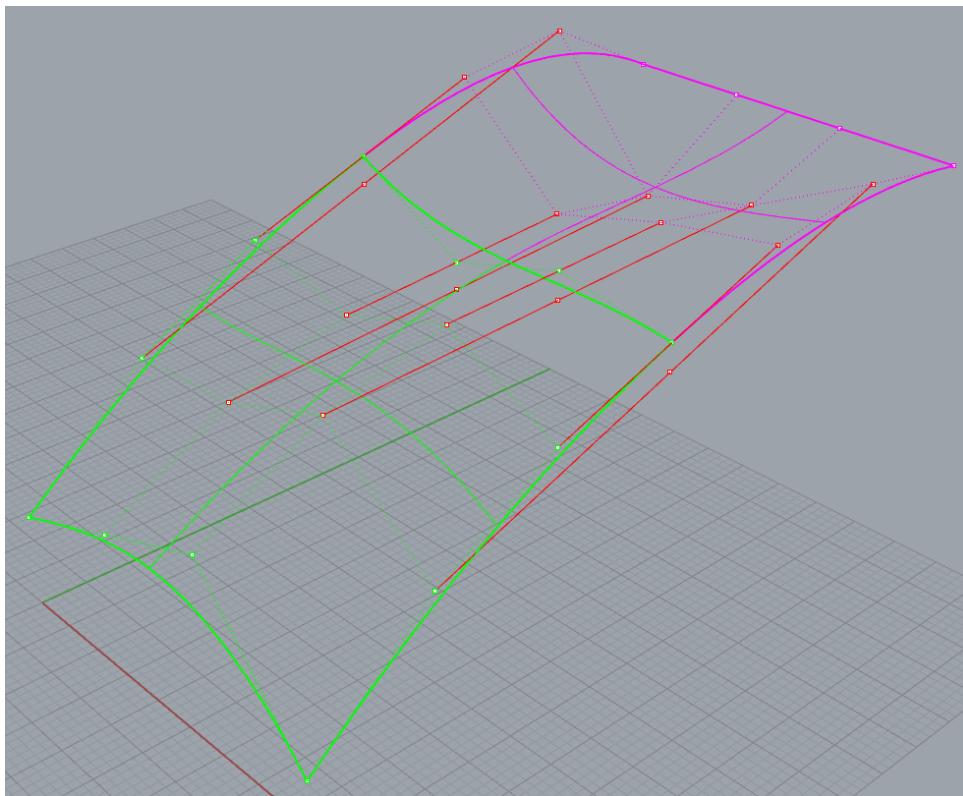
*Obrázek 15: C1 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra (detail)*

### 2.2.3 Návrh dvou ploch se spojitostí C2

C2 spojitost ploch má předpoklady jako u C1 spojitosti a zároveň musí být totožné vektory i druhé derivace v bodech napojení ploch. V případě C2 spojitosti se nemění skokem směr, rychlost ani zrychlení v bodech napojení. [3, 11]

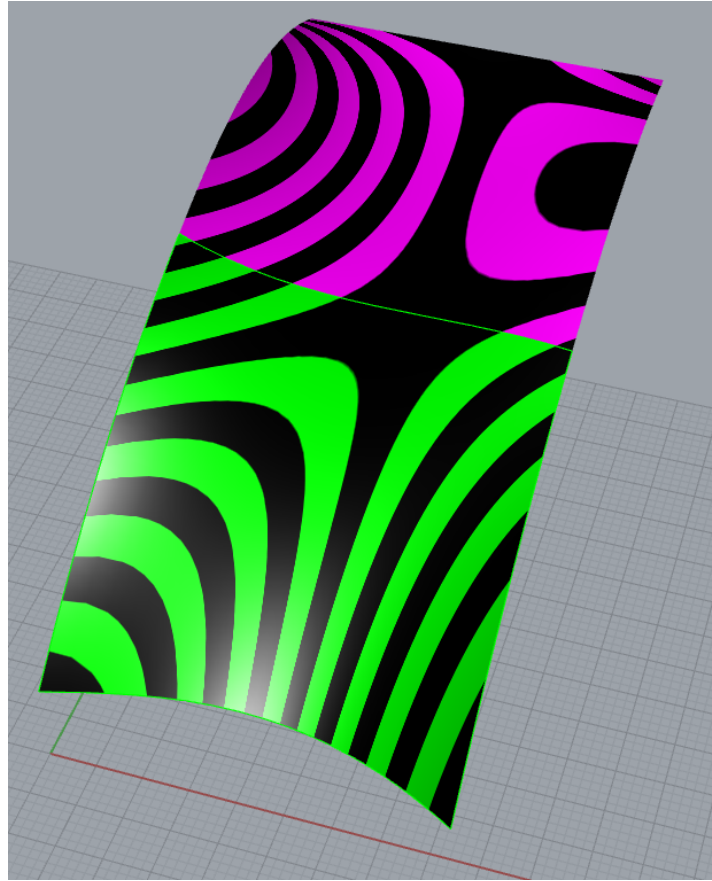
V praxi druhá řada řídicích bodů základní plochy leží na stejné přímce jako třetí řada řídicích bodů plochy 2. Zároveň je tato přímka rovnoběžná s tečným vektorem v bodě napojení ploch. Vzdálenost řídicích bodů v druhé řadě základní plochy od bodů ve třetí řadě řídicích bodů plochy 2 je čtyřnásobek vzdálenosti předposledního a posledního řídicího bodu základní plochy.

Na zbylé řadě řídicích bodů křivky 2 nezáleží. Body, které se již nepodílejí na spojitosti, byly umístěny vždy v ose z na hodnotě 35 a v ostatních dvou souřadnicích xy, tak aby byla zachována čtvercová síť.



Obrázek 16: C2 spojitost napojení dvou ploch - síť řídicích bodů

Při využití analýzy zebra je vidět, že pruhy na sebe souvisle navazují bez jakéhokoli zlomu. Na vysoce lesklých plochách bychom při odrazu světla nezaznamenali žádný přechod.



*Obrázek 17: C2 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra*

### **3 Návrh vzorků a přípravku**

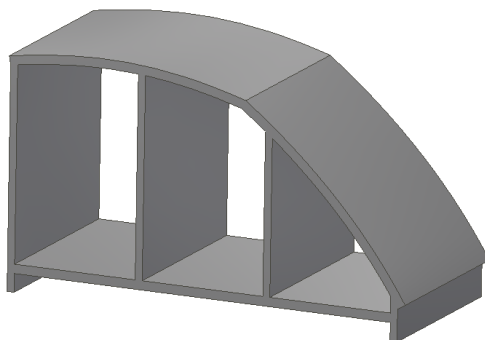
Pro vytvoření modelů v softwaru Autodesk Inventor Professional 2019 (dále jen Inventor) z předpřipravených křivek a ploch jsem využila jiné typy souborů než těch, které vytváří software Rhinoceros 5. Zejména kvůli tomu, aby při importu do Inventoru nedošlo ke ztrátám dat, nebo k chybám při exportu.

U křivek byl postup následující: z formátu \*.3dm jsem uložila do formátu \*.dxf (Drawing Exchange Format). Tento formát jsem vložila do vytvářeného dílu v Inventoru a dokončila návrh dílu. Formát dílů byl \*.ipt (Inventor Part File). Hotový model jsem tak musela uložit jako \*.stl (Stereolithography) z důvodu že softwary pro výpočet drah pro 3D tiskárny požadují tento formát souborů.

U ploch byl tento postup totožný až na to, že z formátu \*.3dm jsem uložila do formátu \*.stp (Step) zejména protože se jednalo již o 3D objekt.

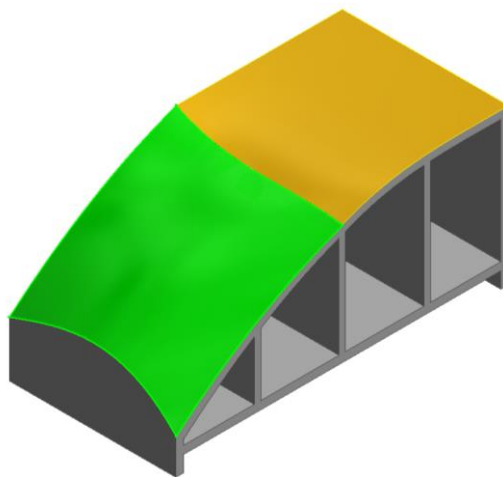
Při navrhování modelů jsem vycházela zejména z toho, že se díly budou tisknout na 3D tiskárnách. Proto jsem volila tloušťku stěn modelů jako násobky 0,4mm. 0,4 mm je totiž průměr trysky u použitých FDM tiskáren a je zvykem volit právě násobky průměru trysky, aby byly dráhy při tisku celistvé. U křivek je tloušťka stěn 1,6mm a 2 mm, u ploch jsem všude navrhla tloušťku 2 mm.

Díly s křivkami s různými geometrickými spojitostmi jsou stejně navrženy. Napojení dvou křivek jsem naklonila o 25° a navrhla jsem podložení křivky čtyřmi žebry (1,6 mm tloušťka). První a poslední žebra jsou prodloužena o 4 mm oproti ostatním z důvodu vložení do přípravku, který je navržen dále.



Obrázek 18: Navržený díl (G0 spojitost napojení křivek)

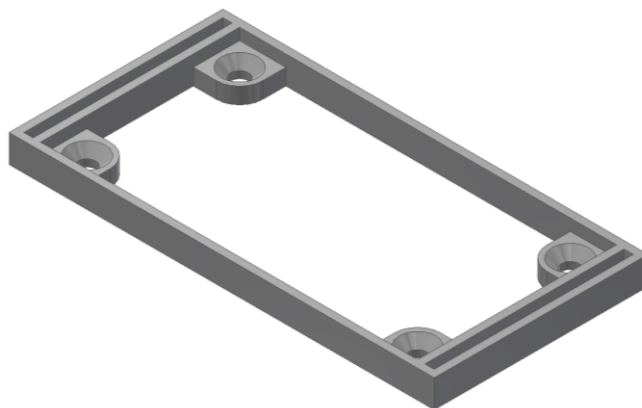
Díly s plochami s různými parametrickými spojitostmi jsou navrženy velmi podobně. Navrhla jsem podložení ploch pěti žebry. První a poslední žebra jsou, stejně jako u dílů s křivkami, prodloužena o 4 mm oproti ostatním z důvodu vložení do přípravku, který je navržen dále.



Obrázek 19: Navržený díl (C0 spojitost napojení ploch)

Všech šest vzorků jsem umístila na sestavu dvou dřevěných prken. Aby zde díly držely a zároveň se mohly vzít do ruky pro lepší analýzu, jsem navrhla díl, který slouží pro umístění vzorků na prkna a také je vytisknut na 3D tiskárně.

Jedná se o obdélník s dvěma drážkami, kam zapadnou prodloužená žebra vzorků. Dále jsou na díle otvory pro vruty do dřeva, kterými jsou uchyceny na dřevěné prkno. Díly jsou v provedení dvou rozměrů, větší rozměr slouží pro uchycení vzorků s křivkami a menší rozměr pro uchycení vzorků s plochami.



Obrázek 20: Upínací díl pro křivky

Celá sestava včetně všech komponentů vymodelovaná v Inventoru vypadá následovně. Jedno prkno je zkosené tak, aby se na něj mohli umístit obrázky z analýzy zebra pro konkrétní případy různých spojitostí napojení ploch.



Obrázek 21: Sestava vymodelovaná v CAD softwaru

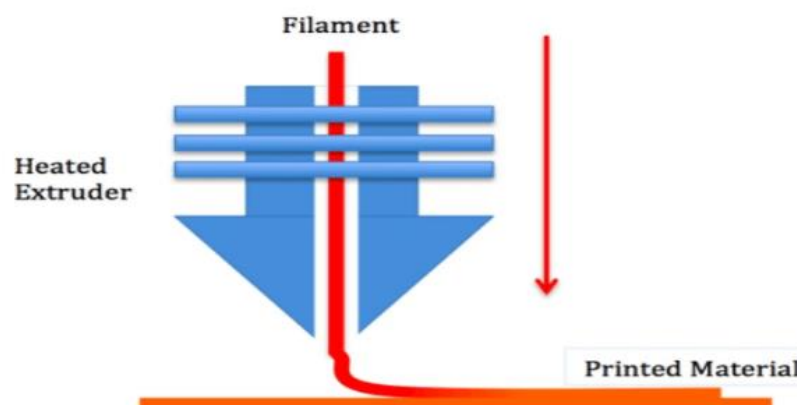
## 4 3D tisk – dostupné technologie a vhodné metody zkvalitnění povrchu s ohledem na materiál

3D tisk je začleněn do aditivních technologií. Tyto technologie spočívají v tom, že se materiál přidává. Odebírání materiálu je podstatně rozšířenější, ale od 80. let 20. století, kdy se 3D tisk poprvé začal objevovat, urazila tato technologie velký kus cesty. Zejména po roce 2005, kdy vypršel patent na dnes nejrozšířenější metodu 3D tisku (FDM), se tato technologie velkou rychlostí rozšířila do všech možných odvětví. Dokonce i do domácností. Dnes již není žádný problém pořídit si domů obstojnou 3D tiskárnu. I s minimálními znalostmi je možné vytisknout si svůj navržený díl, popřípadě stažený díl z internetu. Problém nastává v případě, kdy uživatel chce opravdu kvalitní a vizuálně hezký výtisk. V tu chvíli je nutné mít hlubší znalosti, nejen jaký vhodný materiál použít, ale i jak nastavit software, ve kterém se generují dráhy pro 3D tiskárnu (takzvaný slicer) a také, jaké možnosti úpravy povrchu výtisku po vytištění jsou. [12, 13, 14]

Nejčastěji je možné se setkat s dvěma typy 3D tiskáren. FDM tiskárny a SLA tiskárny. Právě tyto dvě metody 3D tisku byly využity pro vytisknutí dílů a vzorků.

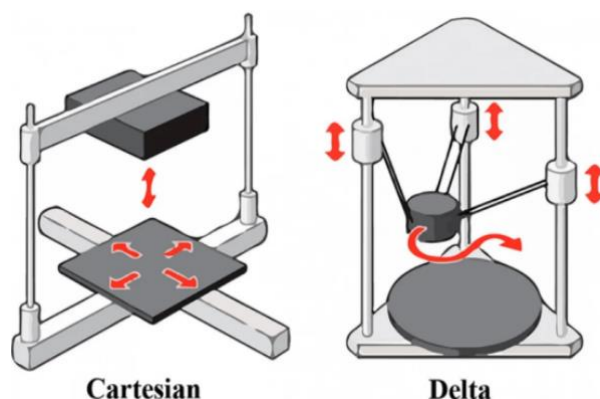
### 4.1 FDM metoda 3D tisku

FDM metoda tisku, neboli fused deposition modeling, se zakládá na principu nanášení vrstev polotekutého termoplastu. Tyto vrstvy se nanášejí na sebe a po zchladnutí vytvářejí celistvý model. Materiál je nejčastěji struna termoplastu, v ojedinělých případech se můžeme setkat s materiálem, který je ve formě granulátu. Materiál prochází tiskovou hlavou, kde se zároveň natavuje a je přiváděn do místa tisku. [13, 15, 16, 17, 18]



Obrázek 22: Princip FDM tisku [16]

FDM tiskárny mají nejčastěji buď kartézskou mechanickou koncepci, nebo delta mechanické uspořádání. U obou použitých 3D tiskárnách pro FDM tisk, je kartézské zpracování kinematiky. [16]



Obrázek 23: Kartézský a delta uspořádání FDM tiskárny [16]

U 3D tisku se často musí vytisknout i podpory, aby se díl během tisku nezhroutil. Ovšem u FDM tisku byly díly navrženy tak, že využití podpor nebylo nutné.

#### 4.1.1 Stratasys F370

Tiskárna Stratasys F370 byla využita k tisku vzorků s G0 a G1 spojitostí. Tuto tiskárnu jsem využila na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě strojní, konkrétně Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie.

Stratasys, Ltd. je výrobcem 3D profesionálních tiskáren. Tato firma v podstatě začala s výrobou FDM tiskáren pro průmyslové odvětví. Jejich tiskárny se pohybují v cenách až do několika miliónů korun českých. U tiskáren Stratasys se setkáme se softwarem GrabCAD Print pro přípravu tiskových dat. [13]

Jedná se o tiskárnu, která má vyhřívanou tiskovou komoru. Díky tomu by nemělo docházet k takové deformaci dílů kvůli teplotní roztažnosti. Na toto technické řešení měl Stratasys donedávna patent.

Tabulka 1: Přehled základních informací o Stratasys F370 [19]

|                               |                                       |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| Přesnost pohybu tiskové hlavy | +/- .200 mm                           |
| Maximální tiskové rozměry     | 355 x 254 x 355 mm                    |
| Materiály                     | PLA, ABS-M30, ASA, PC-ABS,<br>TPU 92A |





Obrázek 24: FDM tiskárna Stratasys F370 [19]

### 4.1.2 Ultimaker 3

Tiskárna Ultimaker 3 byla využita k tisku vzorků s G2 a C0 spojitostí. Byly zde vytištěny i šest kusů dílu pro uchycení vzorků na přípravku. Tuto tiskárnu jsem využila ze soukromých zdrojů.

Ultimaker je firma, jenž poskytuje otevřený software jménem Cura. Tento software je velmi rozšířen v komunitě 3D tiskáren pro přípravu dat. Má výhodu zejména kvůli tomu, že lze v něm nastavit mnoho parametrů. Takže pokud uživatel má zkušenosti a rozumí dané problematice, může dosáhnout opravdu dobré kvality výtisku. Ceny tiskáren od této firmy se pohybují v řádech statisíců korun českých. Výhoda je i v tom, že na tiskárnách není nutné využívat pouze materiál od výrobce, ale lze tisknout s materiály běžně dostupnými. [20]

Tabulka 2: Přehled základních informací o Ultimaker 3 [20]

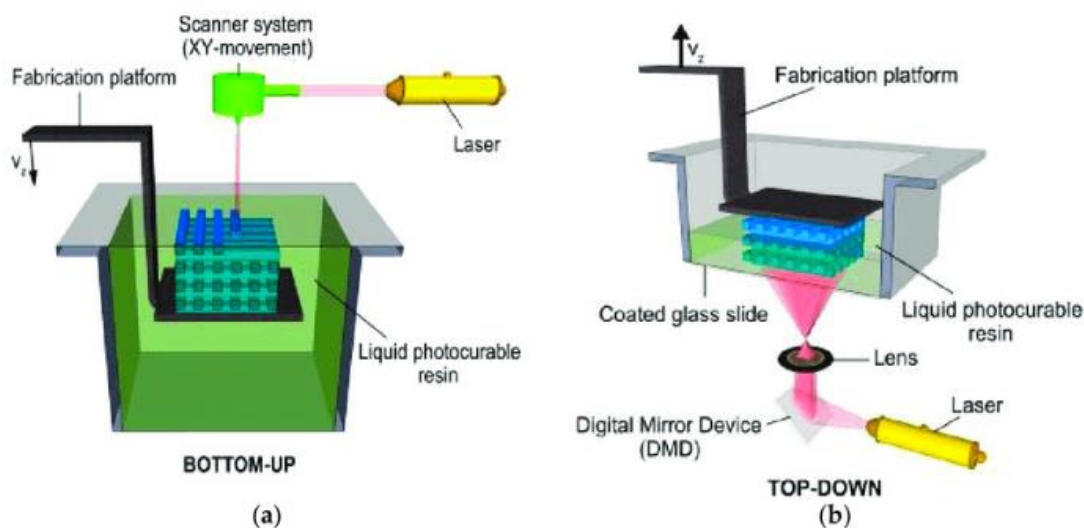
|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Přesnost pohybu tiskové hlavy | +/- .0125 mm           |
| Maximální tiskové rozměry     | 215 x 215 x 200 mm     |
| Materiály                     | PLA, PVA, ABS, CPE, PA |



Obrázek 25: FDM tiskárna Ultimaker 3 [20]

## 4.2 SLA metoda 3D tisku

SLA metoda 3D tisku, neboli Stereolithography, je technologie, která využívá vytvrditelné pryskyřice, takzvaný resin, paprskem světla. Tento paprsek vytvrdí jednu vrstvu a výtisk se pak posune o jednu tloušťku vrstvy. Celý proces se opakuje. Přesnost je podstatně vyšší než u FDM tisku. Při této metodě jednotlivé vrstvy nedokážeme skoro rozeznat. Paprsek je přiváděn do resinu buď horem nebo spodem, viz následující obrázek. [15, 17, 18]



Obrázek 26: Princip SLA tisku a jeho možnosti provedení [21]

Použitá 3D tiskárna na SLA tisk má paprsek světla veden zespona a výtisk je tak tisknut obráceně, než je zobrazeno v softwaru při tvorbě tiskových dat.

### 4.2.1 Formlabs Form 3

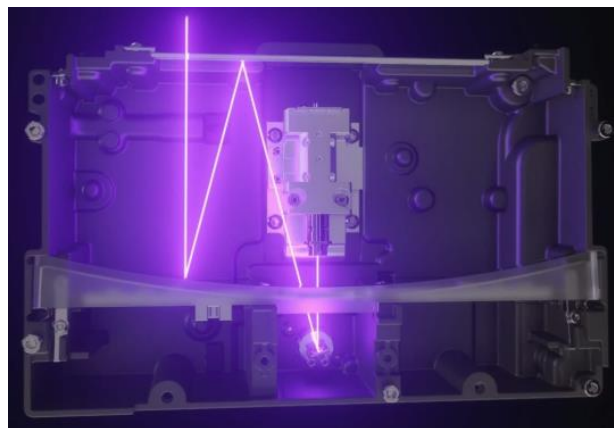
Tiskárna Formlabs Form 3 byla využita k tisku vzorků s C1 a C2 spojitostí. Tuto tiskárnu jsem využila ze soukromých zdrojů.

Firma Formlabs vznikla v roce 2011 a zaměřují se v podstatě hlavně na 3D tisk metodou SLA zejména pro průmysl. Tiskárny od firmy Formlabs se pohybují cenově v řádech jednotek statisíců korun českých. Tato firma dodává i velkou škálu materiálů pro konstruktéry a další uživatele, například i pryskyřice, které mohou v prototypch nahrazovat výrobky z pryže díky své elasticitě. Software, ve kterém se pracuje při přípravě 3D tisku, se nazývá PreForm. [22]



Obrázek 27: SLA tiskárna Formlabs Form 3 [22]

Při metodě tisku SLA chceme, aby paprsek dopadal na místo tisku co nejvíce kolmo právě kvůli vyšší přesnosti. Tato tiskárna disponuje tiskovou hlavou, ve které je umístěna odrazivé zrcadlo ve tvaru paraboly, jež zajistí pokaždé kolmý odraz paprsku. [22]



Obrázek 28: Tisková hlava tiskárny Formlabs Form 3 [22]

## 4.3 Úprava výtisků z FDM tiskárny

Úprava 3D výtisků se anglicky označuje jako postprocessing. Tento pojem se často používá i v České republice. Jedná se o úpravy, které vedou zejména k získání lépe vypadajících povrchů výtisků, ale jedná se i o například vyztužení armaturou, slepení jednotlivých výtisků do jedné komponenty, nebo úprava výtisku do požadovaných rozměrů. [23, 24, 25]

V podstatě se nikdo úpravám po vytištění nevyhne. Pokud uživatel nechce dělat významné úpravy po vytištění, tak přesto musí například odstranit tzv. brim, jenž slouží k tomu, aby se výtisk nezkroutil. Nebo v případě nevhodného nastavení tiskových dat se musí odstranit nechtěné „fousky“ plastu (stringing), které občas vznikají při přejíždění tiskové hlavy. Postprocessing je tak nedílnou součástí 3D tisku. [23, 24]

Důležitou roli při volbě vhodné úpravy výtisku hraje materiál, který je vybrán pro tisk dílu. Nejčastěji se setkáváme s materiálem PLA (kyselina polymléčná), PET-G (polyethyltereftalát s modifikovaným glykolem), ABS (akrylonitril-butadien styren) a PS-HI (HIPS = polystyren s vyšší houževnatostí). [24]

Postprocessing můžeme rozdělit na mechanické a chemické úpravy, které se často navzájem doplňují. Mechanické úpravy jsou nejběžnější, například kvůli odstranění přidaného materiálu z technologických důvodů (podpory, brim a tak podobně).

### 4.3.1 Mechanické úpravy

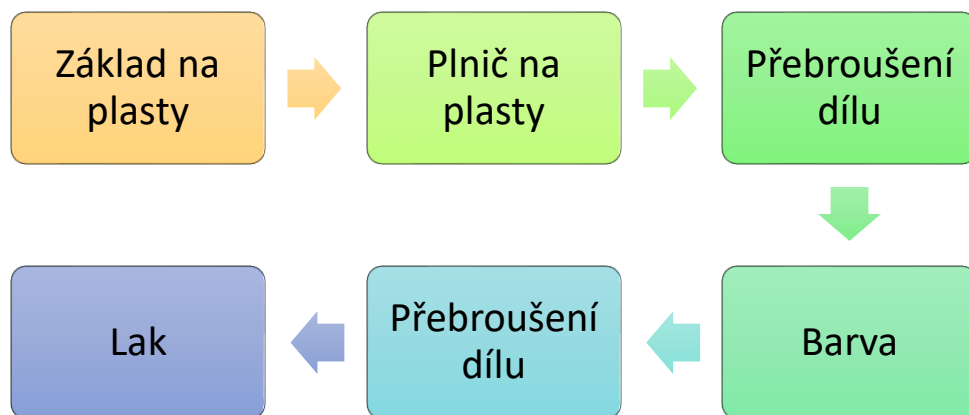
Do této kategorie můžeme zařadit vyřezávání závitů, odstraňování otřepů, podpor a tak podobně. V případě, kdy se na mechanické úpravy zaměříme výhradně pro vytvoření lépe vypadajícího povrchu na neslepeném dílu, je znám ověřený postup.

Nejprve se výtisk musí očistit od nečistot a mastnoty. Poté použijeme základ na plasty. Ten nanášíme z důvodu, aby nám dobře držely další nanášené přípravky. Většinou se nanáší dvě až tři vrstvy. [23, 24]

V dalším kroku použijeme plnič na plasty ve spreji a necháme vrstvu uschnout. Výtisk se přebrousí brusnými papíry od nejvyšší hrubosti až po nejnižší hrubost, tak jak jsme si je připravili. V případě, kdy vidíme, že plnič na plasty dostatečně vyplnil nerovnosti mezi jednotlivými vrstvami, tak pokračujeme dál v postupu. Pokud jsou jednotlivé vrstvy zřejmé na dotek, opakujeme tento krok znovu. [23, 24]

Na přebroušený díl nanese požadovanou barvu, poté po několika minutách aplikujeme další nástřik. Tento postup opakujeme většinou dvakrát s tenkými vrstvami barvy tak, aby nám nestékala při aplikaci. Díl se občas mezi vrstvami barvy přebrousí velmi jemným brusným papírem. [23, 24]

Poslední fáze úpravy je nanesení laku tak, abychom získali odolnou vnější vrstvu a požadovaný lesk. Vrstva laku se většinou aplikuje dvakrát, vždy s několika minutovými rozestupy. Poté se výtisky musí nechat proschnout v bezprašném prostředí alespoň několik hodin, nejlépe jeden den. [23, 24]



Obrázek 29: Zjednodušený postup mechanické úpravy dílu

Tento postup je aplikován v této práci na úpravu vzorků G0 a G2.

Hovoříme zde o mechanických úpravách, ale využíváme zde i chemických reakcí.

Tyto úpravy je nutné dělat v čistém a bezprašném prostředí proto, aby se na nanášené vrstvy nenachytaly nečistoty. Při broušení a lakování je vhodné mít i ochranu dýchacích cest, aby se do plic nedostaly malé částice plastu a prach z brusného papíru a nevdechovali jsme těkavé látky, které jsou ve sprejích.

Při mechanické úpravě ztrácíme určitou rozměrovou přesnost. Toto může ovlivnit i spojitost napojení křivek, resp. ploch. Je nutné dobře promyslet zrnitost brusného papíru a míru broušení.

V případě dílů, které slepíme v jednu komponentu, využíváme i kytování, tak abychom zhladili dělicí roviny mezi jednotlivými slepenými díly. [23]

### 4.3.2 Chemické úpravy

V případě chemické úpravy výtisku se jedná o naleptávání dílů, slepování a podobně. V této práci jsem se zaměřila zejména na naleptání dílu tak, abych získala lesklý povrch dílu, nejlépe i vyhlazený od jednotlivých vrstev.

U chemických úprav hraje zcela zásadní roli, jaký materiál je použitý k vytisknutí dílů, protože podle materiálu se musí zvolit správné rozpouštědlo. [24]

Výtisk se může do rozpouštědla namočit, popřípadě natřít jen na požadovaných plochách, opláchnout v izopropylalkoholu a poté nechat oschnout. V tomto případě však často nedochází k rovnoměrnému naleptání povrchu.

Jako lepší způsob se jeví využití par rozpouštědla. Do vhodné nádoby, nejlépe skleněné, umístíme dospod ubrousek napuštěný rozpouštědlem. Výtisk poté pověsíme nad ubrousek, nebo jej umístíme na podložku tak, aby se ubrousku nedotýkal. Nádobu uzavřeme a lehce ji zahřejeme. Díky tomu uspíšíme vypařování rozpouštědla z ubrousku. Po naleptání povrchu výtisku do požadovaného stavu výtisk vyndáme a opláchneme v izopropylalkoholu, abychom zastavili naleptávání.

Celý proces naleptávání může trvat rozdílnou dobu a závisí na množství rozpouštědla, velikosti výtisku, intenzitě zahřívání a podobně. Je nutné proto během procesu věnovat pozornost na průběh reakcí a nevzdalovat se. Konkrétní dobu je nutné vyzkoušet praxí.

Dobrych výsledků naleptání na lesk lze dosáhnout u materiálu ABS, pro kterým je rozpouštědlem aceton. U PLA je rozpouštědlem chloroform. [24]

Při leptání je velmi důležité myslet na zdraví pracovníka. Rozpouštědla jsou často velmi toxická a je nutné vše provádět na dobře větraném místě, nejlépe venku. Vhodné je využití respirátoru, rozhodně i použití ochranných chemicky odolných rukavic je na místě. Zároveň je nutné zajistit čisté prostředí, aby se na výtisk během manipulace nedostaly nečistoty.

Naleptávání je využito v této práci na vzorky G1 a C0.

## 4.4 Úprava výtisků z SLA tiskárny

Po vytisknutí dílu na SLA tiskárně ho nelze rovnou použít na požadovanou aplikaci. Je nutné dodržet postup pro dokončení výtisku.

Výtisk se na podložce (popřípadě se může i z podložky sundat) nejprve opláchne v izopropylalkoholu od zbytku resinu. Nechá se oschnout a poté se umístí do vytvrzovací stanice, kde je pomocí tepla a UV nechán na vytvrzení dle návodu od výrobce k danému materiálu.

Po vyndání z vytvrzovací stanice se odlomí podpory a v případě potřeby se jemně obrousí plochy, na kterých jsou známky od podpor. Po této fázi je výtisk hotov.

Povrch výtisků z SLA tiskáren je většinou zcela vyhovující. V případě, že uživatel chce například lesklou barvu povrchu, je možné díl nabarvit. Není třeba použít plnič na plasty, jako v případě výtisků z FDM tiskárny, protože při kvalitním tisku jsou jednotlivé vrstvy skoro k nerozeznání.

Při barvení se nejprve použije základ na plasty, protože je potřeba vytvořit vrstvu, na které nám ulpí barva. Nechá se zaschnout. Nanese se požadovaná barva. Celý proces se opakuje tolikrát, dokud výsledná sytost barvy není zcela podle představ. Nakonec se nanese lak.

Postup je v podstatě totožný jako u FDM výtisků, ovšem s vynecháním prvních kroků a bez broušení.



Obrázek 30: Zjednodušený postup úpravy

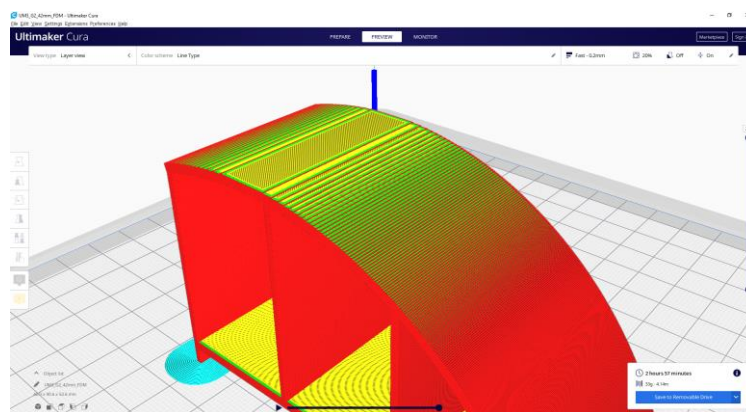
## 5 Příprava tisku, tisk vzorků a dílů

Příprava tiskových dat pro 3D tiskárnu je velmi důležitou fází. Nastavení tisku v softwarech na generování dat, hlavně orientace dílu na tiskové podložce, je pro 3D tisk klíčové, zejména pokud chceme kvalitní výtisk.

U tiskáren se setkáváme často se softwary, které mají pro vybrané materiály připravené tiskové profily. Ovšem u různých výrobců, kteří mají uzavřené softwary, se liší otevřenost dalšího nastavení parametrů. Profily se mohou upravit buď, jen v základních parametrech, jako je například tloušťka vrstvy a stěny, nebo množství a styl výplně. U pokročilejších softwarů se množství nastavitelných parametrů zásadně liší. Lze nastavit například i rychlost a akceleraci pohybu tiskové hlavy, zažehlení povrchu, teplotu trysky i podložky, nastavení chlazení a podobně. Tímto lze dosáhnout kvalitnějších výtisků, pokud uživatel má zkušenosti a znalosti. Velmi důležitý je fakt, že tímto lze dosáhnout optimalizované doby tisku. [14, 15, 24, 26]

Doba tisku je zásadní údaj, který je nutný sledovat. Pomocí vhodného nastavení je možné docílit kratší doby tisku až o několik hodin. Zejména u hůře tisknutelných materiálů je toto důležité kritérium, kdy kvůli dlouhému tisku může dojít vlivem působení tepla ke zkroucení, či odtržení dílu od podložky, a tak k znehodnocení celého procesu. Příkladem hůře tisknutelného materiálu s ohledem na teplotní roztažnost je materiál ABS. [23, 24, 26]

Jak bylo zmíněno, je důležitá orientace umístění dílu na tiskové podložce, proto všechny vzorky tisknuté na FDM tiskárnách jsou tisknuty na boku. Důvodem je zajištění spojitého napojení drah, aby nedocházelo k vzniku schodů na pohledových plochách. Na obrázku je ukázán příklad, co by se mohlo stát při nevhodné orientaci dílu.



Obrázek 31: Ukázka vygenerování schodů na vzorku G2 v softwaru Cura

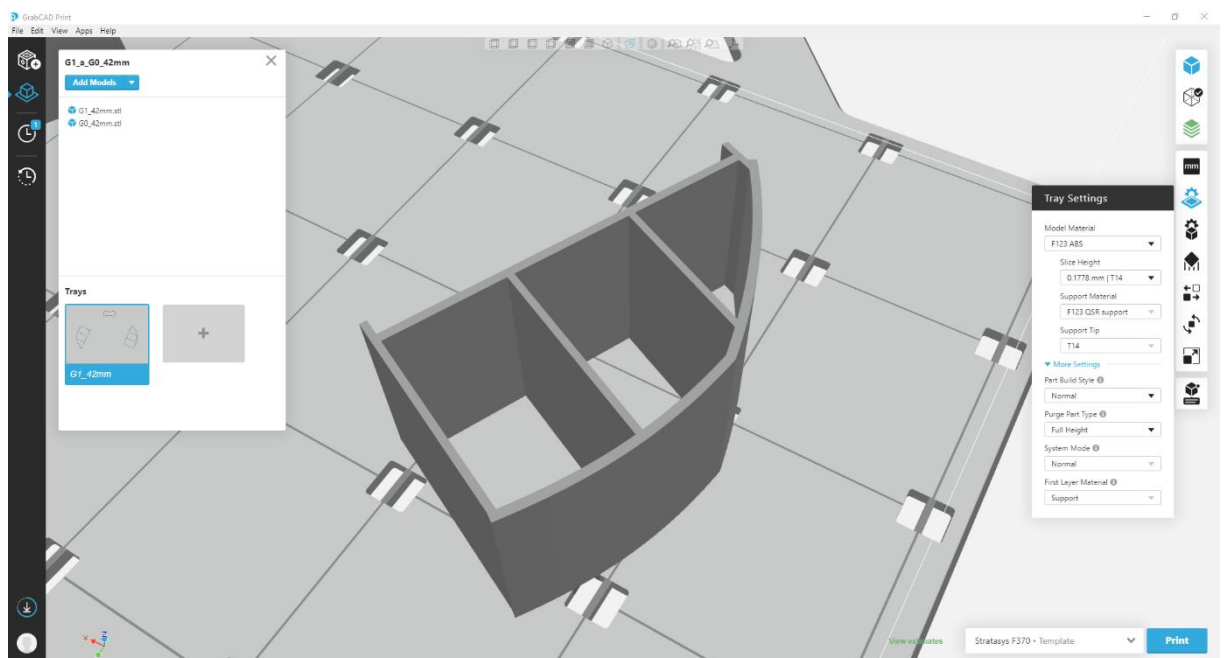


## 5.1 Vzorky se spojitostí G0 a G1

Vzorky G0 a G1 byly vytisknuty na FDM tiskárně Stratasys F370 z materiálu ABS, který byl dodán přímo od výrobce. Tisková data byla připravena v softwaru GrabCAD Print.

Při nastavování tisku v softwaru neexistuje mnoho parametrů, které by bylo možné měnit. Nastavili jsme tloušťku vrstvy 0,1778 mm. Tisk proběhl bez podpor. Díl byl tisknut celkem z 249 vrstev.

Pro adhezi k tiskové podložce je generován takzvaný raft. Jedná se o vytisknutou celistvou podložku, na které se teprve poté začne tisknout vzorek.

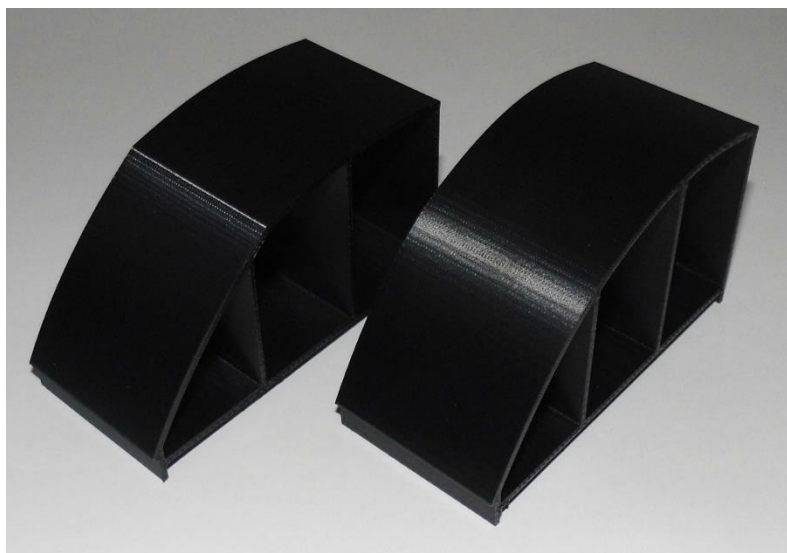


Obrázek 32: Nastavení tisku vzorků G0 a G1

Doba tisku obou vzorků je 7 hodin a 41 minut. Tento čas je ovšem lehce zavádějící, protože se tiskl nejprve vzorek G0 a až poté G1. Tisk probíhal na dvakrát, zejména z důvodu tepelných vlastností materiálu ABS. Pokud by tisk probíhal naráz, tak by byla vyšší pravděpodobnost zkroucení dílu během tisku, popřípadě k popraskání.

| Tray Estimations |                                     |        |
|------------------|-------------------------------------|--------|
| G1_42mm          | Print Time                          | 7h 41m |
|                  | Model Material (cm <sup>3</sup> )   | 60.752 |
|                  | Support Material (cm <sup>3</sup> ) | 9.932  |

Obrázek 33: Vygenerované informace o tisku vzorků G0 a G1



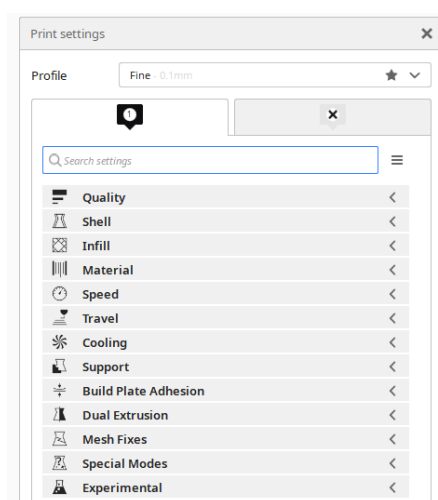
Obrázek 34: Vytisknuté vzorky G0 a G1

## 5.2 Vzorky se spojitostí G2 a C0

Vzorky G2 a C0 byly vytisknuty na FDM tiskárně Ultimaker 3 z materiálu PLA, který byl dodán přímo od výrobce. Tisková data byla připravena v softwaru Cura. Pro oba tisky byly nastaveny stejné parametry.

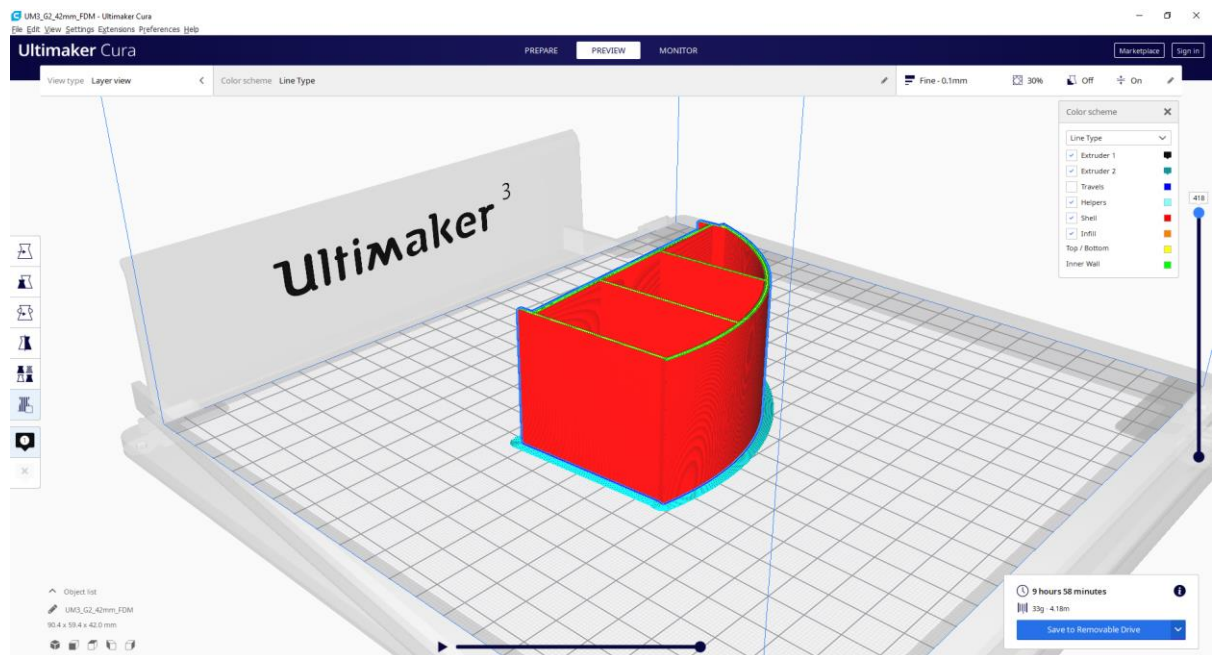
Při nastavování tisku jsem vybrala profil pro materiál Ultimaker Black PLA, pro který je možné nastavit základní parametry, jako je tloušťka vrstvy, zvolena na 0,1 mm, procento výplně, podpory a zapnutí brim pro adhezi. Tímto ale možnosti nastavení tisku nekončí. V pokročilém nastavení je možné upravit přednastavené parametry v jednotlivých sekcích.

Oproti profilu jsem zapnula chlazení plastu a brim jsem nastavila všude, nejen na vnějším okraji výtisku. Šířka nastavená u brim je 3 mm.

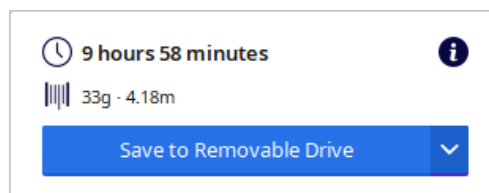


Obrázek 35: Možnosti pokročilejšího nastavení v softwaru Cura

Vzorky byly tisknuty ze 418 vrstev. Na obrázku jsou tyto vrstvy znázorněné. Vygenerovaný čas tisku pro díl G2 je 9 hodin a 58 minut. Celkem se spotřebovalo 4,18 m materiálu.

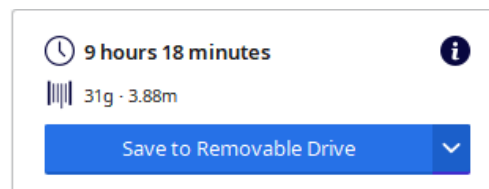


Obrázek 36: Vzorek G2 - nastavení tisku



Obrázek 37: Vygenerovaný čas pro G2

Pro vzorek C0 je vygenerovaný čas velmi podobný – 9 hodin a 18 minut. Celkem se spotřebuje na tisk 3,88 m materiálu.



Obrázek 38: Vygenerovaný čas pro C0

Reálný čas byl o něco vyšší zejména z důvodu, že u jednotlivých dílů byly přidáné tři kusy dílu pro upnutí křivek a ploch.

Po nastavení tisku se ve formátu \*.gcode nahrál soubor do tiskárny přes ethernet.

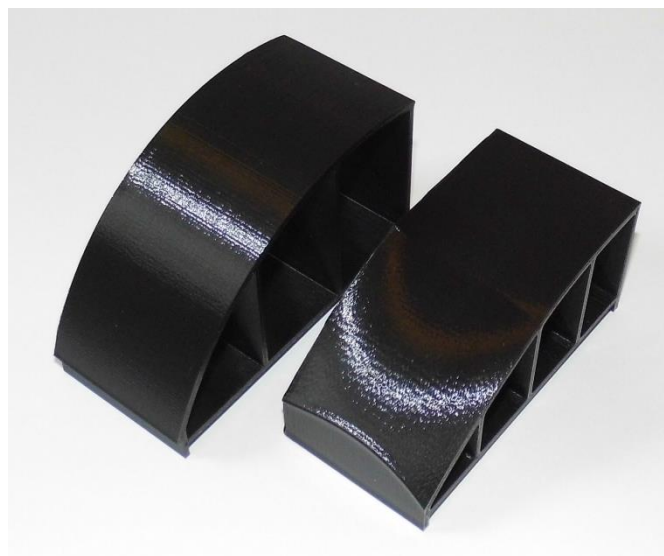


*Obrázek 39: Tisk vzorku G2 a dílů pro upnutí*

Po vytištění vzorků jsem musela nejprve odstranit brim z obou výtisků.



*Obrázek 40: Odstraněný brim vzorku G2*



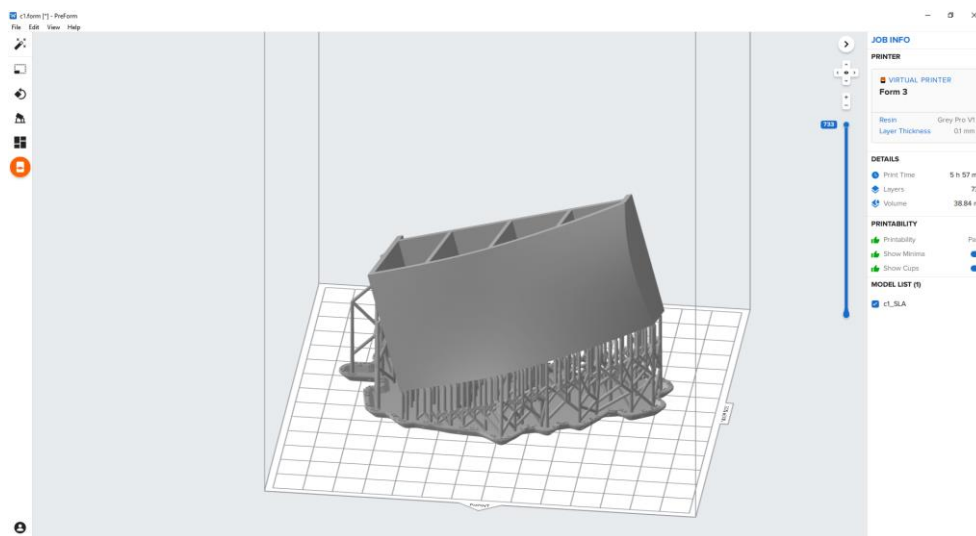
*Obrázek 41: Vytištěné vzorky G2 a C0*

### 5.3 Vzorky se spojitostí C1 a C2

Vzorky C1 a C2 byly vytištěny na SLA tiskárně Formlabs Form 3 z resinu Grey Pro, který byl dodán přímo od výrobce. Tisková data byla připravena v softwaru Preform.

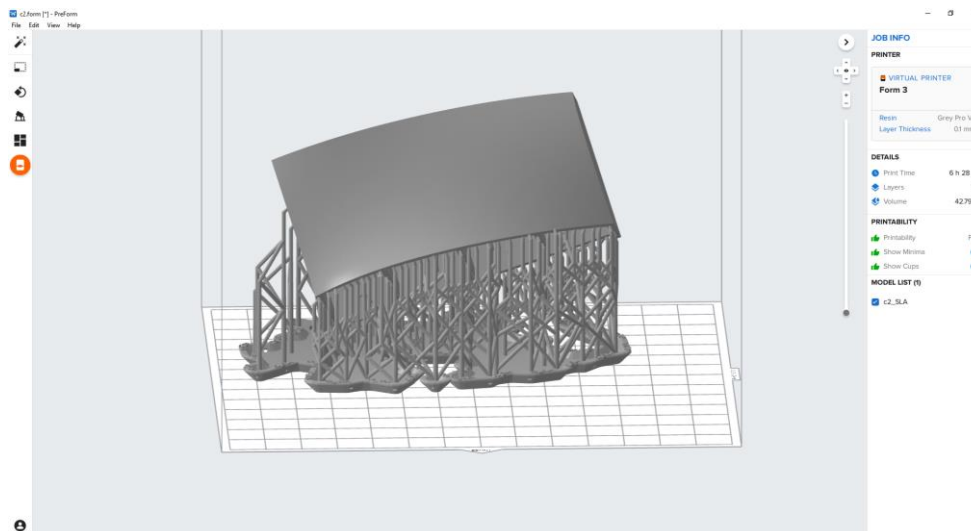
U softwaru Preform je omezené množství parametrů, které lze nastavit. Tloušťka vrstvy byla u obou výtisků stejná, 0,1 mm. Další nastavení proběhlo zejména v orientaci modelu a optimalizování vygenerovaných podpor.

Vzorek C1 je tisknut z 733 vrstev. Spotřebuje se 38,34 ml resinu. Celkový čas tisku je vypočítaný na 5 hodin a 57 minut.



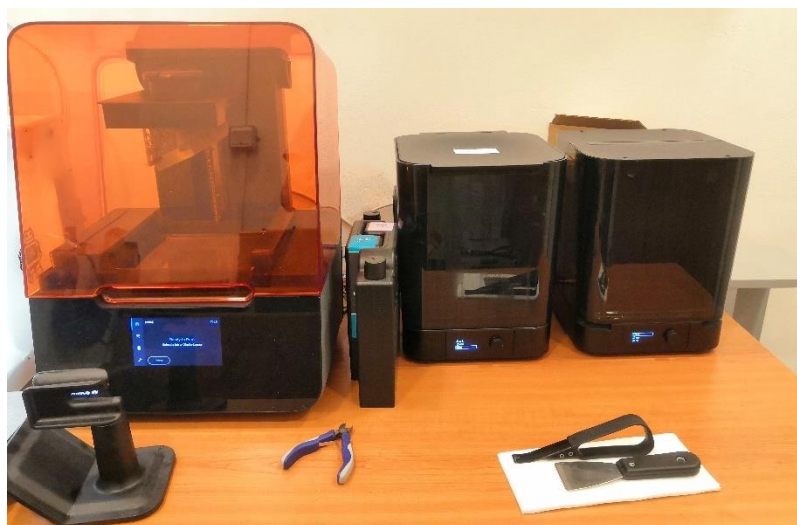
Obrázek 42: Vzorek C1 - nastavení tisku

Vzorek C2 je tisknut také z 733 vrstev. Spotřebuje se 42,79 ml resinu. Celkový čas tisku je vypočítaný na 6 hodin a 28 minut.



Obrázek 43: Vzorek C2 - nastavení tisku

Po vytištění se vzorky nejprve vložily do čistící stanice, aby se v izopropylalkoholu omyly od zbytku resinu. Výtisky bylo nutné nechat uschnout. Poté se umístily do vytvrzovací stanice a zde se při teplotě 80°C na 15 minut nechaly vytvrdit pod UV světlem.

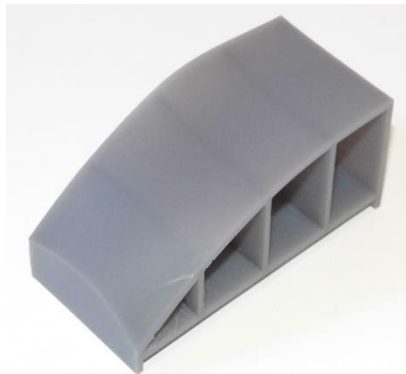


Obrázek 44: Tiskárna Formlabs 3, čistící stanice a vytvrzovací stanice

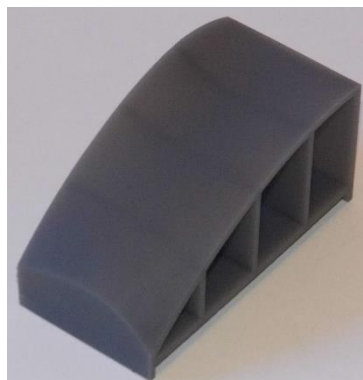


*Obrázek 45: Vytvrzený vzorek C1*

Po vytvrzení bylo nutné vzorky očistit od podpor. To jsem udělala pomocí štípacích kleští. Jedná se o křehký materiál a bylo nutné postupovat opatrně, aby se vzorky neponičily.



*Obrázek 46: Vytištěný a očištěný vzorek C1*

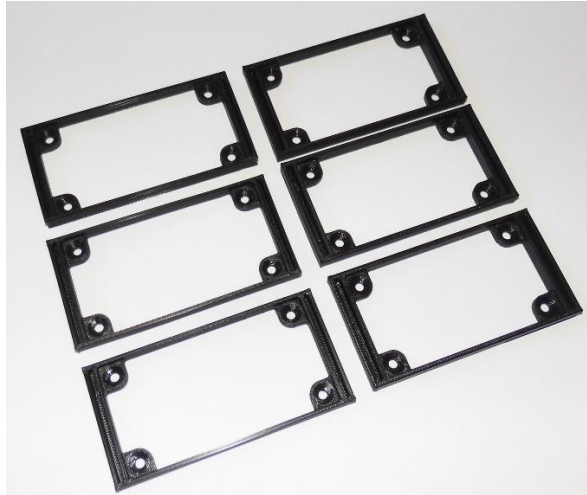


*Obrázek 47: Vytištěný a očištěný vzorek C2*

## 5.4 Upínací díly

Upínací díly jsou tisknuty na FDM tiskárně Ultimaker 3 z materiálu PLA, který byl dodán přímo od výrobce. Tisková data byla připravena v softwaru Cura.

Jak bylo zmíněno výše, byly díly tisknuté s vzorky G2 a C1. Tloušťka vrstvy byla také 0,1 mm.



Obrázek 48: Vytištěné upínací díly

## 6 Postupy zkvalitňování povrchů vzorků (Postprocessing)

Povrchy vzorků jsem se snažila upravit tak, aby funkční plochy se spojitostí byly lesklé. Tak, aby se od těchto ploch lépe odráželo světlo a zároveň ukázat možnosti dosažení lepší kvality povrchů výtisků z 3D tiskáren. Jediný vzorek bez přídavné povrchové úpravy je C2.

Praktické znalosti o úpravě výtisků jsem hlavně čerpala z konzultací s uživateli 3D tiskáren, také z mnoha videí z internetu, kde se touto problematikou zabývají mnozí nadšenci do 3D tisku. Teprve v nedávné době se objevují i různé publikace a příručky, které se věnují 3D tisku. Svě poznatky o 3D tisku si totiž firmy, které se touto technologií věnují, z pochopitelných důvodů nechávají pro sebe.



## 6.1 Zpracování vzorků se spojitostí G1 a C0

U vzorků se spojitostí G1 a C0 jsem využila chemického způsobů postprocessingu – naleptávání. Vzhledem k tomu, že jsem pracovala s látkami, které není vhodné vdechovat, zejména chloroform, prováděla jsem tuto část zpracování vzorků venku. Navíc jsem použila ochranou celoobličejovou masku s filtry třídy FFP3 a také chemicky odolné rukavice. Na sobě jsem měla ochranný plášť do laboratoře.



Obrázek 49: Ochranné pomůcky k leptání

Obě použitá rozpouštědla jsem zakoupila přes internet. Rozpouštědla bylo možné objednat pouze s použitím IČO, protože ne všechny látky jsou volně dostupné.

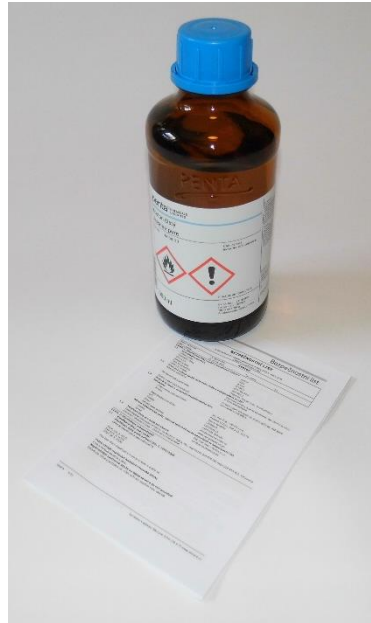
Nádoba, ve které docházelo k uvolnění výparů rozpouštědel, byla skleněná.



Obrázek 50: Použitá nádoba na leptání

### 6.1.1 Vzorek se spojitostí G1

Vzorek G1 je z ABS. Jak již bylo zmíněno, tak pro materiál ABS je rozpouštědlem aceton. Použila jsem 99% aceton od firmy Penta.



Obrázek 51: Aceton s bezpečnostním listem

Do skleněné nádoby jsem vložila papírové ubrousky, na ně jsem nalila dostatečné množství acetonu. Výtisk jsem nejprve očistila oplachem v izopropylalkoholu. Poté jsem jej umístila na sklenici v nádobě a nádobu uzavřela. Pomocí horkovzdušné pistole jsem nádobu zahřívala, aby se aceton začal vypařovat. Aceton je těkavá látka, která by se časem vypařila sama od sebe. Zahřívání bylo pro urychlení reakce.



Obrázek 52: Zahřívání nádoby s acetonem

Nádobu jsem zahřívala 30 minut. Pak jsem vzorek vyndala a vložila do izopropylalkoholu. Poté jsem vzorek nechala oschnout a pozorovala jsem míru naleptání. Bohužel nedošlo k takovému naleptání, jaké jsem chtěla.



*Obrázek 53: Osychání vzorku G1*

Je pravděpodobné, že doba ve výparech byla moc krátká. Na druhou stranu, pokud bych nechala vzorek moc dlouho ve výparech acetonu, tak by mohlo dojít k změknutí materiálu a tím k poškození vzorku.

Rozhodla jsem se naleptat vzorek pomocí přímého natření acetonu na výtisk. Nejprve jsem nanesla první vrstvu co nejrovnoměrnější a výtisk opláchla v izopropylalkoholu. Zhodnotila jsem po oschnutí stav povrchu. Nakonec jsem postup ještě jednou opakovala pro získání lepšího lesku.



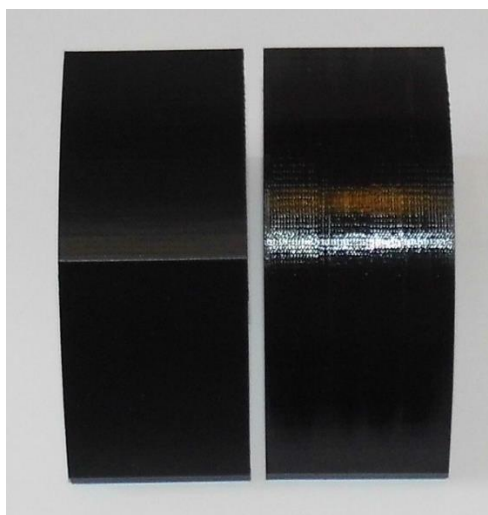
*Obrázek 54: Nanášecí acetonu přímo na vzorek G1*

Po aplikaci acetonu přímo na vzorek byla patrná proměna povrchu. Povrch vzorku po naleptání získal vyšší lesklost. Na povrchu byly ovšem patrné jednotlivé dráhy po tazích štětcem, ačkoli jsem se snažila o rovnoměrné nanášení acetonu.



*Obrázek 55: Vzorek G1 po naleptání*

Při porovnání vzorků G0 a G1, které jsou ze stejného materiálu, je rozdíl velmi dobře patrný. Naleptaný vzorek G1 má podstatně vyšší odrazivost světla než vzorek druhý. Ovšem také více vynikly i jednotlivé vrstvy po tisku.



*Obrázek 56: Porovnání vzorků G0 a G1*

## 6.1.2 Vzorek se spojitostí C0

Vzorek C0 je z PLA. Jak již bylo zmíněno, tak pro materiál PLA je rozpouštědlem chloroform. Použila jsem 99% chloroform od firmy Penta.

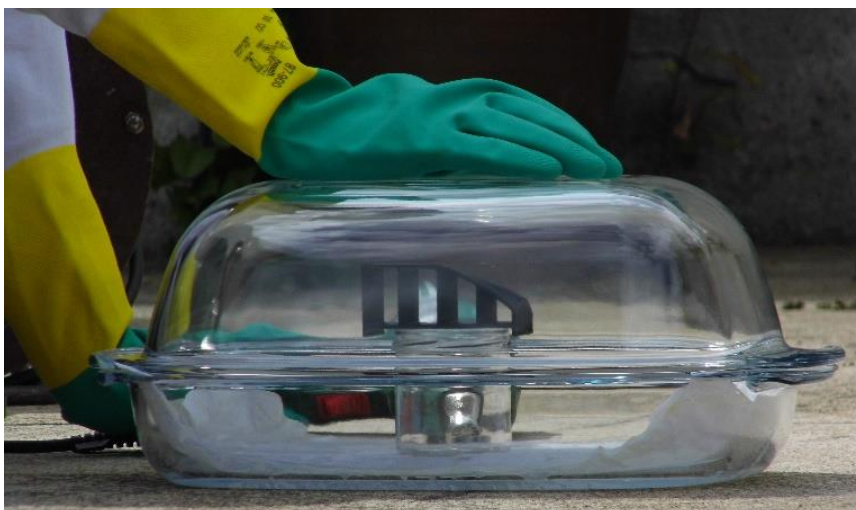


Obrázek 57: Chloroform s bezpečnostním listem

Celý postup jsem opakovala stejně jako u předchozího vzorku. Ovšem v tomto případě bylo nutné vyší opatrnosti při manipulaci s chloroformem. Jedná se o těkavou látku, která může při nadýchání velkého množství způsobit ztrátu vědomí.

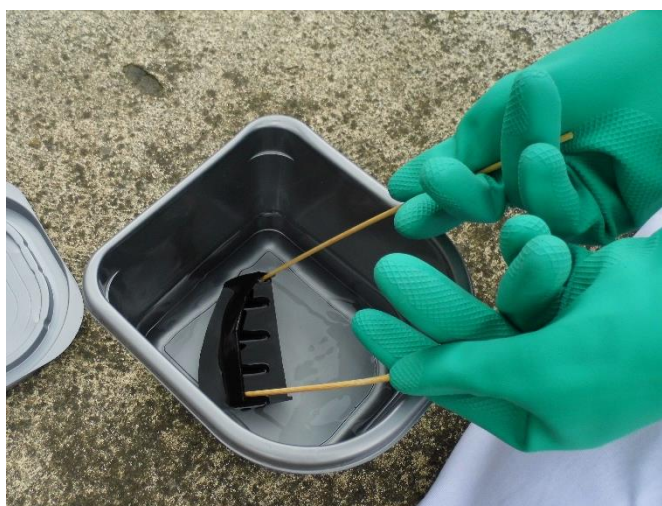


Obrázek 58: Zahřívání nádoby s chloroformem



*Obrázek 59: Detail nádoby s chloroformem*

Výtisk jsem v nádobě s výpary nechala 40 minut a poté jsem také vzorek opláchla v izopropylalkoholu a nechala ho oschnout.



*Obrázek 60: Oplach vzorku C0 v izopropylalkoholu*

Bohužel ani v tomto případě míra naleptání nebyla uspokojivá, ačkoli papírové ubrousky byly suché, muselo tam rozhodně dojít k uvolnění výparů chloroformu.



I na tento vzorek jsem aplikovala chloroform přímo, tak abych docílila požadovaného naleptání povrchu. Stejně jako u předchozího vzorku jsem nanesla dvě vrstvy.



*Obrázek 61: Nanášení chloroformu přímo na vzorek C0*

V tomto případě se mi podařilo nanést rozpouštědlo lépe a nejsou tak patrné jednotlivé tahy štětce. Povrch vzorku je lesklý.



*Obrázek 62: Vzorek C0 po naleptání*

Při porovnání vzorků G2 a C0, které jsou ze stejného materiálu, je rozdíl patrný. Vzorek C0 má vyšší odrazivost světla. Nedošlo u něj ovšem k vyhlazení jednotlivých vrstev vytisknutého materiálu.



*Obrázek 63: Porovnání vzorků G2 a C0*



## 6.2 Zpracování vzorků se spojitostí G0 a G2

Vzorky G0 a G2 jsem upravovala oba naráz. Oba dva vzorky jsem mechanicky upravovala pomocí broušení a barvení.

Vzhledem k tomu, že jsem používala spreje, ve kterých byly těkavé látky, tak jsem použila respirátor třídy FFP3, ochranné brýle a rukavice.



*Obrázek 64: Ochranné pomůcky k lakování*

Aby nanesené vrstvy byly při lakování bez nečistot, vytvořila jsem provizorní stan pomocí mikrotenových fólií.



*Obrázek 65: Stan na lakování*

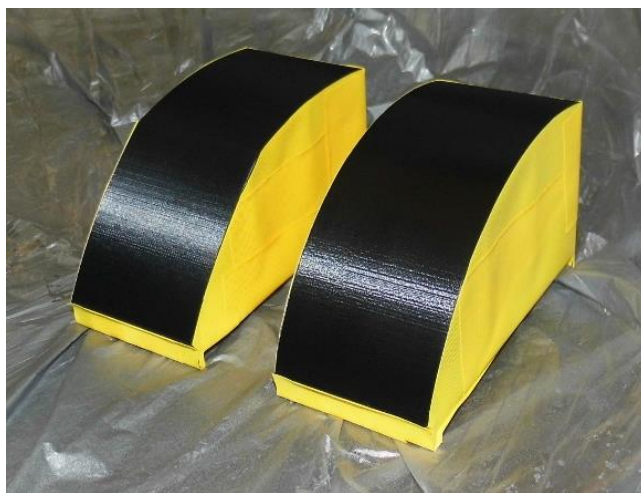
Všechny dále použité přípravky jsou běžně dostupné v obchodech. Pro nanesení vrstvy jen na požadované plochy jsem vzorky zamaskovala páskou.

Nejprve jsem vzorky očistila od nečistot ofoukáním stlačeným vzduchem a poté i oplachem v izopropylalkoholu.

První nanášený přípravek byl základ na plasty. Po pěti minutách od nanesení první vrstvy jsem nastříkala na vzorky ještě jednu a nechala 5 minut zaschnout. Základ na plasty má za úkol vytvořit vrstvu, na které budou lépe ulpívat další nanášené přípravky.



*Obrázek 66: Základ na plasty ve spreji*

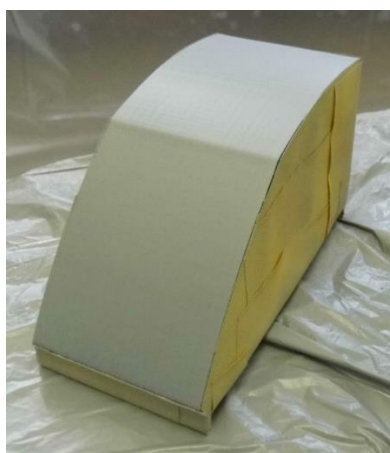


*Obrázek 67: Zamaskované vzorky po nanesení základu na plasty*

V dalším kroku jsem použila plnič na plasty ve spreji, který dle doporučení výrobce má zasychat 15 minut. Já jsem čas na vyschnutí prodloužila na 30 minut, aby při následném broušení byla vrstva plniče na vzorku kompaktní.



Obrázek 68: Plnič na plasty

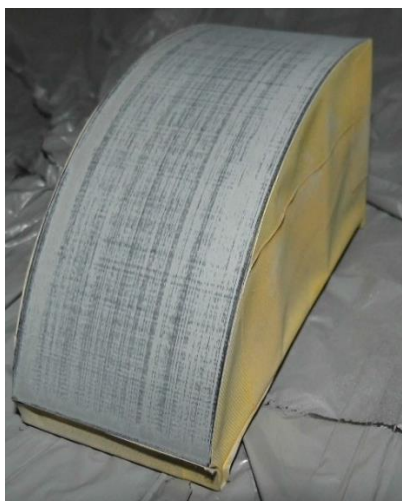


Obrázek 69: Vzorek G0 po nanesení plniče na plasty

Vzorky jsem poté obrousila brusným papírem se zrnitostí 400, poté 1000, 1500 a nakonec 2000. Tento postup slouží k úplnému zahlazení povrchu vzorků. Účel plniče je zacelit prohlubně mezi jednotlivými vrstvami a broušením jsem se snažila docílit, aby plnič zůstal právě jen v těchto místech.



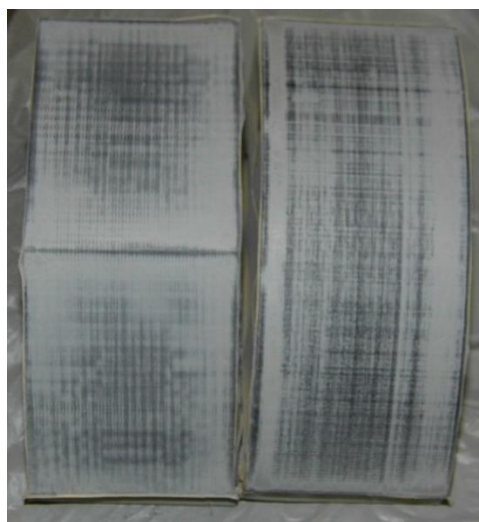
Obrázek 70: Použité brusné papíry



*Obrázek 71: Stav vzorku G2 po prvním obroušení*

Na povrchu vzorků po prvním přebroušení bylo stále znát jemně jednotlivé vrstvy tisknuté struktury. Proto jsem vzorky očistila ofoukáním stlačeným vzduchem a znovu na ně nanesla vrstvu plniče na plasty. Doba zaschnutí byla také 30 minut.

Vzorky jsem přebrousila stejným postupem jako poprvé. Nyní byl povrch na dotek zcela hladký. Očistila jsem vzorky od nečistot a pokračovala jsem v dalším postupu.



*Obrázek 72: Stav vzorků po druhém broušení*

Dalším krokem bylo nanesení chromové barvy ve dvou vrstvách po 5 minutách, dle pokynů výrobce. Nanášení bylo nutné provést plynule tak, aby byla na vzorcích rovnoměrná vrstva. Před nanesením dalšího přípravku jsem nechala barvu oschnout 20 minut.



Obrázek 73: Barva



Obrázek 74: Vzorek G2 po nanesení první vrstvy barvy

Posledním krokem bylo nanesení vrstvy bezbarvého laku na oba vzorky pro získání vysokého lesku a pro ochranu barvy, například před UV zářením. Lak jsem nanesla ve dvou vrstvách po 5 minutách. Po nanesení druhé vrstvy jsem vzorky umístila do skleněné nádoby a nechala zde 24 hodin pro vyschnutí.



Obrázek 75: Lak



Obrázek 76: Vzorek G0 po nanesení první vrstvy laku

Vzorky po vyschnutí mají vyšší lesk, než měly po nanesení vrstvy laku. Struktura pohledových ploch jsou celistvé a vyhlazené. Pouze v některých rozích je znát nižší kvalita povrchu. Tato nedokonalost mohla nastat při nedobroušení a při nestejném nanesení vrstvy barvy.

Odrazivost u hotových vzorků je vyšší než u vzorků, které jsou leptané.



Obrázek 77: Hotové vzorky G0 a G2

### **6.3 Zpracování vzorku se spojitostí C2**

Vzorek C2 jsem upravovala pouze pomocí barvení. Vzorek C2 jsem také zamaskovala.

Využila jsem stejné ochranné pomůcky a stejné místo na nanášení vrstev jako u úpravy vzorků G0 a G2.

Celý postup jsem zopakovala jako u vzorků G0 a G2 pouze s rozdílem, že jsem vynechala nanášení plniče a broušení.

Nejprve jsem nanesla dvě vrstvy základu na plasty, poté dvě vrstvy barvy, nakonec dvě vrstvy laku. Mezi jednotlivými vrstvami byly stejné časové přestávky jako v předchozí kapitole. Po dokončení lakování jsem vzorek také nechala 24 hodin vyschnout.



*Obrázek 78: Zamaskovaný vzorek C2 po nanesení základu na plasty*

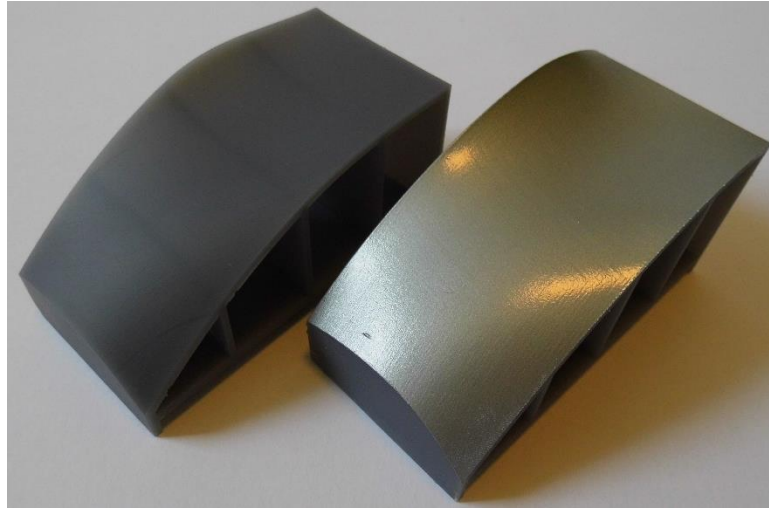


*Obrázek 79: Vzorek C2 po nanesení první vrstvy barvy*



*Obrázek 80: Hotový vzorek C2*

Při porovnání vzorků C1 a C2 je patrné, že získaná odrazivost, díky vrstvě barvy, zvýraznila jednotlivé tloušťky vrstvy. Povrch stále působí celistvě a na dotek jednotlivé tloušťky vrstvy nejsou cítit.



*Obrázek 81: Porovnání vzorků C1 a C2*



## 7 Výroba přípravku

Výroba přípravku spočívala v opracování prken, jejich slepení a přichycení upínacích dílů pro vzorky.

Prkno jsem si zajistila z vlastních zásob. Jedná se o smrkové dřevo. Prkno bylo několik let uskladněné v suchém prostředí.

Nejprve se celé prkno ohoblovalo na staré protahovací hoblovce od firmy Panhans, která do dnes vyrábí zařízení pro zpracování dřeva. Upravilo se na tloušťku 25 mm. Od stejné firmy se použila i srovnávačka na kratší hranu prkna tak, aby šířka prkna byla 120 mm. Tímto se odstranila stará vrstva dřeva.



Obrázek 82: Protahovací hoblovka od firmy Panhans



Obrázek 83: Srovnávačka od firmy Panhans

Na formátovací pile PT300M od firmy Rojek se prkno nejprve na neopracované hraně zkosilo o 30° a poté se nařezalo na požadovanou délku 350 mm v počtu dvou kusů.



Obrázek 84: Formátovací pila PT300M od firmy Rojek

Obě prkna jsem ručně obrousila pomocí pásové brusky, brusných papírů a brusné houbičky. Poté se prkna slepila lepidlem Super wood na dřevo od firmy Bison, jenž by, dle uvedení výrobce, mělo splňovat normu EN 204 D3. Vytvrdnutí lepidla trvalo 24 hodin podle instrukcí výrobce.



Obrázek 85: Slepění prken

Dále se prkna navrtala v místě slepení ještě 3 vruty tak, aby byl v případě povolení lepidla přípravek stále funkční.

Předposlední fází zhotovení prken bylo nalakování přípravkem Polyurex. Po zaschnutí se slepená prkna přebrousila a ještě jednou nalakovala.

Naměřila jsem požadované umístění upínacích dílů a vyznačila místa, kde mají být jednotlivé díly uchyceny. Poté jsem pomocí vrutů připevnila díly.



*Obrázek 86: Sestava prken s díly pro uchycení vzorků*

Na zkosenou plochu sestavy jsem umístila obrázky vzorků s analýzou zebra, aby byly jednotlivé typy spojitosti napojení představitelnější.



*Obrázek 87: Hotový přípravek se vzorky I*

## **8 Vyhodnocení 3D tisku a metod úprav vzorků**

Vyhodnocení je provedeno několika způsoby, nejdůležitějším vyhodnocovacím kritériem je zejména porovnání chemického a mechanického způsobu úpravy vzorků.

### **8.1 Cena tiskáren FDM x SLA**

Porovnání FDM tisku a SLA tisku z hlediska vstupních nákladů, myšlena je zde cena tiskárny, je jednoznačné. FDM tiskárny na plast jsou všeobecně levnější, pokud se bavíme o stejném tiskovém objemu. Tiskárny tohoto typu se pohybují již od jednotek tisíc pro domácí využití. V případě průmyslových tiskáren se jedná okolo desítek až stovek tisíc. Cena zejména narůstá s větším prostorem pro tisk. V případě tiskáren Stratasys se dostáváme k miliónům korun českých. Zde bychom mohli polemizovat, zda vyšší cena není ovlivněna i značnou výrobku.

Cena SLA tiskáren pro domácí využití se pohybuje nejméně kolem pětitisíc korun českých, ale zpravidla s polovičním tiskovým objemem. V případě průmyslových tiskáren se bavíme o statisícových částkách. Další záležitostí je i to, že s tiskárnou musíme pořídit i vytvrzovací komoru, což znamená další výdaje. Často výrobci ovšem nabízejí balíček tiskárna, čistící stanice a vytvrzovací komora.

### **8.2 Cena materiálů pro FDM x SLA tisk**

U ceny materiálů je situace stejná. Obecně lze říci, že materiál pro FDM tisk je levnější než pro tisk metodou SLA. Cena materiálů pro FDM začíná na několika stovkách korun českých za kilogram. Může však dle materiálu vystoupat až na desítky tisíc, například struna z nylonu, která je vyztužena uhlíkovými vlákny.

Resin u SLA tisku začíná cenově na jednotkách tisíc korun za litr.

Pro porovnání nákladů je zde uvedena tabulka, kde je cena materiálu na jednotlivé výtisky.

Tabulka 3: Přehled cen materiálu na vzorky

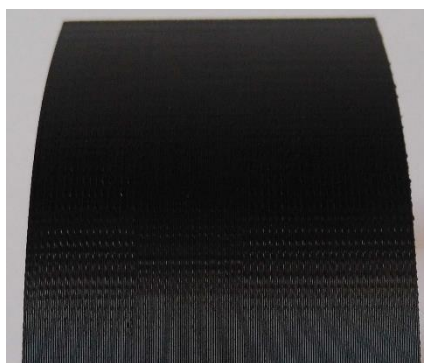
| Výtisk | Materiál       | Velikost               | Cena materiálu [Kč] |
|--------|----------------|------------------------|---------------------|
| G0     | ABS            | 60,752 cm <sup>3</sup> | 8,44 euro (225)     |
| G1     |                |                        |                     |
| G2     | PLA            | 33 g                   | 50,12               |
| C0     |                | 31 g                   | 47,08               |
| C1     | Resin Grey Pro | 38,34 ml               | 223,45              |
| C2     |                | 42,79 ml               | 249,38              |

Vzorky z SLA tisku jsou jednoznačně nejdražší. Cenově druhým nejdražším materiálem je ABS z tiskárny Stratasys F370. Materiál PLA je nejlevnější.

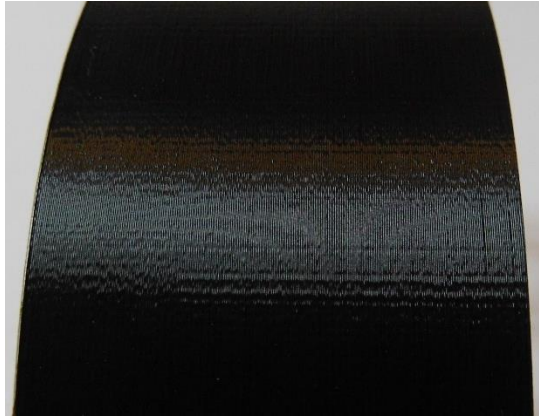
Porovnání lze nejlépe provést mezi vzorky G0, G1 a G2 a druhé mezi vzorky s parametrickou spojitostí napojení, protože se pokaždé jedná v podstatě o stejně velké díly.

### 8.3 Kvalita výtisků z FDM x SLA tiskárny

Kvalita vytisknutých vzorků z FDM tiskáren byla podobná. Při detailnějším prozkoumání je zřejmé, že nastavení tloušťky vrstev z tiskárny Ultimaker 3 bylo jemnější. Jednotlivé vrstvy zde byly méně pozorovatelné než u vzorků ze Stratasysu F370. Odrazivost je u vzorků z FDM tisku relativně dobrá.



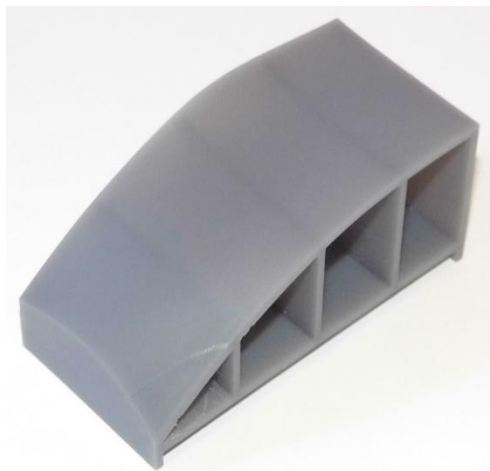
Obrázek 88: Detail vzorku G0 (Stratasys F370)



*Obrázek 89: Detail vzorku G2 (Ultimaker 3)*

Při porovnání vzorků z FDM tiskáren a SLA tiskárny je na první pohled patrný rozdíl. Vzorky z SLA tisku nejsou odrazivé zcela vůbec. Mají ovšem celistvou strukturu a na první pohled nelze rozeznat jednotlivé vrstvy. Pokud se zaměříme na detail povrchu je možné spatřit jemné dráhy po tisknutí. Na dotek však nic neucítíme.

Při porovnání vzorků z Ultimaker 3 a Formlabs Form 3, kdy u obou byla nastavena tloušťka vrstvy 0,1 mm, je kvalita vzorků z SLA tisku vyšší.



*Obrázek 90: Vzorek C1 (Formlabs Form 3)*

## 8.4 Chemické úpravy x mechanické úpravy vzorků

V případě porovnávání způsobů úpravy vytisknutých vzorků dle náročnosti, i časové, jsou mechanické úpravy náročnější. Největší rozdíl je v tom, že mezi jednotlivými kroky u mechanických úprav je nutné dělat technologické přestávky. Tím se celý proces hodně prodlužuje. Na úpravu je nutné více přípravků.

V případě chemických úprav je potřebné mít pouze vhodné ochranné pomůcky, rozpouštědlo a štětec, kterým budeme chemikálii na výtisk nanášet. V případě leptání výpary je na druhou stranu velkou nevýhodou, že není možné přesně vědět, jak bude proces probíhat a jak dlouho je nutné výtisk ve výparech ponechat. Z toho hlediska vyhodnocuji přímé nanášení rozpouštědla na výtisk jako účinnější, ačkoli nedochází k tak rovnoměrnému působení na výtisk.

Při porovnávání ceny chemického a mechanického způsobu úpravy výtisků je levnější chemická úprava. Ovšem pokud hledíme jen na cenu použitých přípravků. Náklady na přípravky pro mechanické úpravy byly kolem jednoho tisíce korun (nejsou započítány náklady na provizorní lakovací stan). Náklady na obě dvě rozpouštědla pro chemické úpravy byly kolem čtyř set korun českých. U všech použitých přípravků zbylo ještě dostatečné množství náplně pro další úpravy výtisků ze 3D tiskáren.

Nejdůležitější hledisko porovnání těchto dvou způsobů úprav výtisků je kvalita po dokončení postprocessingu. Vzorky, které jsem chemicky naleptávala mají horší kvalitu výsledného povrchu než vzorky, které jsem upravovala mechanicky. Jak bylo zmíněno výše, vzorky po leptání sice získaly vyšší odrazivost, ale nepodařilo se zahladit jednotlivé tloušťky vrstvy po tisku. U mechanicky opracovaných vzorků z FDM tiskáren došlo pomocí zejména broušení k docílení hladkého povrchu. U vzorku z SLA tisku po nabarvení a získání lesklé vrstvy došlo k zvýraznění struktury po tisku. Na dotek je povrch hladký, ale vyšší kvalitu výsledného povrchu jsem docílila broušením u vzorků z FDM tiskáren. Odrazivost vzorků, na kterých je nanesená chromová barva je lepší než odrazivost vzorků po leptání.

## Závěr

Cílem práce bylo vytvořit přípravek se vzorky, které reprezentují různé typy geometrické a parametrické spojitosti napojení. Tento obecný cíl je dále rozčleněn na další podskupinu cílů, které jsou popsány v práci.

Pro získání vzorků bylo nejprve nutné definovat různé typy spojitosti křivek, resp. ploch, a další pojmy k tomu vázané. Toto vše je uvedeno v první kapitole práce, kde najdeme i vysvětlení použitých analýz spojitosti napojení.

Ve druhé kapitole se věnuji vlastnímu návrhu křivek, resp. ploch, a je zde vysvětlen princip různých typů spojitosti napojení. Třetí kapitola obsahuje dokončení jednotlivých návrhů v 3D vzorky. Je zde i předběžná představa koncepce celkového přípravku.

Čtvrtá kapitola se zabývá 3D tiskem a vybranými tiskárnami tak, aby čtenářovi přiblížila zvolené technologie 3D tisku – FDM a SLA tisk. Nachází se zde i popis možných postupů zkvalitnění 3D výtisků (postprocessing).

V páté kapitole najdeme přípravu tisku vzorků a dílů. Jsou zde popsány stručně nastavené parametry a fotky vytištěných vzorků.

Šestá kapitola je zaměřena na postprocessing vzorků, a to chemicky i mechanicky. Postup je zde vysvětlen krok za krokem. V sedmé kapitole realizuji samotný přípravek.

Poslední kapitola je vyčleněna na zhodnocení zvolených technologií mezi sebou na základě cen tiskáren, cen materiálů a kvality vytištěných vzorků. Je zde i porovnání chemického a mechanického způsobu úpravy vzorků.

Nejdražší použitá technologie je FDM tisk na stroji Stratasys F370, na které byly tisknuty vzorky G0 a G1. Materiál pro tisk vychází nejlevněji PLA, poté ABS, a nakonec resin pro SLA tisk.

Kvalita vzorků po vytištění byla nejlepší z technologie SLA.

Při porovnání chemického a mechanického způsobu úpravy hodnotím chemický jako méně náročný, jak časově, tak i finančně. U chemického způsobu úpravy může dojít k obtížnému sehnání potřebných rozpouštědel, například chemikálie chloroform.

Po mechanickém způsobu úpravy povrchu jsem dokázala docílit lepší kvality výsledného povrchu než u chemicky upravovaných vzorků.



## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] LINKEOVÁ, Ivana. Základy počítačového modelování křivek a ploch. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04011-9.
- [2] KOMKOV, Valentin. Modelování ploch pro automobilové karosérie [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66556/F2-BP-2016-Komkov-Valentin-BP%20Komkov%20Valentin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.  
Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivana Linkeová, Ph.D.
- [3] MORAVEC, Andrej. Křivky, Plochy. SlidePlayer [online]. c2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3000488/>
- [4] SLANINA, Jan. Spojitost křivek a ploch 1. 3DAkademie.cz [online]. DIMENSIO, c2017, 13.4.2014 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://3dakademie.cz/2014/04/spojitost-krivek-a-ploch-1-dil/>
- [5] SLANINA, Jan. Spojitost křivek a ploch 2. 3DAkademie.cz [online]. DIMENSIO, c2017, 13.4.2014 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://3dakademie.cz/2014/04/spojitost-krivek-a-ploch-2-dil/>
- [6] SLANINA, Jan. Spojitost křivek a ploch 3. 3DAkademie.cz [online]. DIMENSIO, c2017, 13.4.2014 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://3dakademie.cz/2014/04/spojitost-krivek-a-ploch-3/>
- [7] Analýzy. Autodesk Inventor 2015 [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2015/CSY/?guid=GUID-06875B9A-57D1-4C06-8DB6-8934BB6702B3>
- [8] VIRELUX: Inspection systems [online]. Lucembursko: VIRELUX Inspection Systems s. à r. l., c2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://gerardbaseotto.wixsite.com/webs>
- [9] Production in detail: how is a Porsche created? Porsche Newsroom – The Media Portal by Porsche [online]. Dr. Ing. h.c. F. Porsche, c2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://newsroom.porsche.com/en/company/leipzig/production-in-detail.html>

- [10] Urus light tunnel 2: Lamborghini. Thenewsmarket [online]. TheNewsMarket, c2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.thenewsmarket.com/urus-light-tunnel-2/a/bd6db74a-e637-4b03-be81-ce3214f57002>
- [11] FELKEL, Petr. Křivky a plochy I. Dokuwiki [online]. Praha: ČVUT, 2018, 2016 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: [https://cw.fel.cvut.cz/old/\\_media/courses/b0b39pgr/10-krivky.pdf](https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/b0b39pgr/10-krivky.pdf)
- [12] JALOVEC, Tomáš a Marek ŽEHRA. 3D tisk pro každého?!. Model hobby. Praha: Dart, 2014, XIX(9), 29-30.
- [13] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, [2015]. Make: (Maker Media): (Maker Media). ISBN 978-981-4571-40-1.
- [14] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Second edition. New York: Springer, [2015]. Reihe Gesellschaftswissenschaften: (Maker Media). ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [15] KLOSKI, Liza Wallach, Nick KLOSKI a B. STUCKER. Začínáme s 3D tiskem: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Second edition. Brno: Computer Press, 2017. Reihe Gesellschaftswissenschaften: (Maker Media). ISBN 978-80-251-4876-1.
- [16] What is FDM 3D printing? Creality [online]. China: Creality 3D [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://creality.com/info/makers-guide-what-is-fdm-3d-printing-i00373i1.html>
- [17] HLOUSEK, Petr a Bill FANE. 3D printing: a prospective challenge for manufacturing: a manufacturing revolution. 4th edition of Rapid prototyping. Saarbrücken: AV Akademikerverlag, [2015]. Reihe Gesellschaftswissenschaften: (Maker Media). ISBN 978-3-639-86523-3.
- [18] MENKEN, Ivanka a Kalani Kirk HAUSMAN. 3D printing: complete certification kit. 2nd edition. Brisbane: Art of service, [2012]. Core series for IT (The art of service). ISBN 978-1-4864-5645-1.

- [19] Stratasys: F123 Series [online]. Stratasys, c2017 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.objective3d.com.au/wp-content/uploads/2019/01/stratasus-f123-brochureNEW.pdf>
- [20] Ultimaker [online]. Ultimaker BV, c2011-2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/>
- [21] ResearchGate [online]. ResearchGate, c2008-2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-two-kinds-of-SLA-approaches-a-Bottom-up-setup-In-the-top-down-setup-b\\_fig1\\_322014553](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-two-kinds-of-SLA-approaches-a-Bottom-up-setup-In-the-top-down-setup-b_fig1_322014553)
- [22] 3D Wiser [online]. Praha: 3Dwiser, c2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/>
- [23] PrusaPrinters [online]. Praha: Prusa Research, c2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: [https://www.prusaprinters.org/cs#\\_ga=2.264968335.1473450651.1593691401-1713436995.1592055075](https://www.prusaprinters.org/cs#_ga=2.264968335.1473450651.1593691401-1713436995.1592055075)
- [24] FRANCE, Anna Kaziunas. Make: 3D printing. Sebastopol: Maker Media, 2013. ISBN 978-1-457-18293-8.
- [25] Jak upravit model po 3D tisku. Futlab [online]. 2018 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://futlab.cc/uprava-modelu-po-3d-tisku/>
- [26] KELLY, James F. a Kah Fai LEONG. 3D printing: build your own 3D printer and print your own 3D objects. 4th edition of Rapid prototyping. Indianapolis: Que, 2013. Make: (Maker Media): (Maker Media). ISBN 978-0-7897-5235-2.

## Seznam obrázků, tabulek a příloh

|  |        |
|--|--------|
| Obrázek 1: Ukázka grafu křivosti, konkrétně křivky G1 spojitě napojené ..... | - 15 - |
| Obrázek 2: Ukázka analýzy zebra, konkrétně na vzorku G0 spojitostí .....     | - 16 - |
| Obrázek 3: Možnosti nastavení zebra analýzy .....                            | - 16 - |
| Obrázek 4: Ukázka analýzy zebra v automotive 1 [9].....                      | - 17 - |
| Obrázek 5: Ukázka analýzy zebra v automotive 2 [10].....                     | - 17 - |
| Obrázek 6: G0 spojitost dvou křivek – graf křivosti .....                    | - 19 - |
| Obrázek 7: G1 spojitost dvou křivek .....                                    | - 20 - |
| Obrázek 8: G1 spojitost dvou křivek – graf křivosti .....                    | - 21 - |
| Obrázek 9: G2 spojitost dvou křivek – graf křivosti .....                    | - 22 - |
| Obrázek 10: Základní plocha.....   | - 23 - |
| Obrázek 11: C0 spojitost napojení dvou ploch - síť řídicích bodů.....        | - 24 - |
| Obrázek 12: C0 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra.....            | - 24 - |
| Obrázek 13: C1 spojitost napojení dvou ploch - síť řídicích bodů.....        | - 25 - |
| Obrázek 14: C1 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra.....            | - 26 - |
| Obrázek 15: C1 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra (detail).....   | - 26 - |
| Obrázek 16: C2 spojitost napojení dvou ploch - síť řídicích bodů.....        | - 27 - |
| Obrázek 17: C2 spojitost napojení dvou ploch - analýza zebra.....            | - 28 - |
| Obrázek 18: Navržený díl (G0 spojitost napojení křivek).....                 | - 29 - |
| Obrázek 19: Navržený díl (C0 spojitost napojení ploch) .....                 | - 29 - |
| Obrázek 20: Upínací díl pro křivky .....                                     | - 30 - |
| Obrázek 21: Sestava vymodelovaná v CAD softwaru.....                         | - 30 - |
| Obrázek 22: Princip FDM tisku [16] .....                                     | - 31 - |
| Obrázek 23: Kartézský a delta uspořádání FDM tiskárny [16] .....             | - 32 - |
| Obrázek 24: FDM tiskárna Stratasys F370 [19] .....                           | - 33 - |
| Obrázek 25:FDM tiskárna Ultimaker 3 [20].....                                | - 34 - |
| Obrázek 26: Princip SLA tisku a jeho možnosti provedení [21].....            | - 34 - |
| Obrázek 27:SLA tiskárna Formlabs Form 3 [22] .....                           | - 35 - |
| Obrázek 28: Tisková hlava tiskárny Formlabs Form 3 [22].....                 | - 35 - |
| Obrázek 29: Zjednodušený postup mechanické úpravy dílu .....                 | - 37 - |

|  |        |
|--|--------|
| Obrázek 30: Zjednodušený postup úpravy .....                                 | - 39 - |
| Obrázek 31: Ukázka vygenerování schodů na vzorku G2 v softwaru Cura .....    | - 40 - |
| Obrázek 32: Nastavení tisku vzorků G0 a G1 .....                             | - 41 - |
| Obrázek 33: Vygenerované informace o tisku vzorků G0 a G1 .....              | - 41 - |
| Obrázek 34: Vytisknuté vzorky G0 a G1 .....                                  | - 42 - |
| Obrázek 35: Možnosti pokročilejšího nastavení v softwaru Cura .....          | - 42 - |
| Obrázek 36: Vzorek G2 - nastavení tisku .....                                | - 43 - |
| Obrázek 37: Vygenerovaný čas pro G2 .....                                    | - 43 - |
| Obrázek 38: Vygenerovaný čas pro C0 .....                                    | - 43 - |
| Obrázek 39: Tisk vzorku G2 a dílů pro upnutí .....                           | - 44 - |
| Obrázek 40: Odstraněný brim vzorku G2 .....                                  | - 44 - |
| Obrázek 41: Vytisknuté vzorky G2 a C0 .....                                  | - 44 - |
| Obrázek 42: Vzorek C1 - nastavení tisku .....                                | - 45 - |
| Obrázek 43: Vzorek C2 - nastavení tisku .....                                | - 46 - |
| Obrázek 44: Tiskárna Formlabs 3, čisticí stanice a vytvrzovací stanice ..... | - 46 - |
| Obrázek 45: Vytvrzený vzorek C1 .....  | - 47 - |
| Obrázek 46: Vytisknutý a očištěný vzorek C1 .....                            | - 47 - |
| Obrázek 47: Vytisknutý a očištěný vzorek C2 .....                            | - 47 - |
| Obrázek 48: Vytisknuté upínací díly .....                                    | - 48 - |
| Obrázek 49: Ochranné pomůcky k leptání .....                                 | - 49 - |
| Obrázek 50: Použitá nádoba na leptání .....                                  | - 49 - |
| Obrázek 51: Aceton s bezpečnostním listem .....                              | - 50 - |
| Obrázek 52: Zahřívání nádoby s acetonem .....                                | - 50 - |
| Obrázek 53: Osychání vzorku G1 .....   | - 51 - |
| Obrázek 54: Nanášecí acetonu přímo na vzorek G1 .....                        | - 51 - |
| Obrázek 55: Vzorek G1 po naleptání .....                                     | - 52 - |
| Obrázek 56: Porovnání vzorků G0 a G1 .....                                   | - 52 - |
| Obrázek 57: Chloroform s bezpečnostním listem .....                          | - 53 - |
| Obrázek 58: Zahřívání nádoby s chloroformem .....                            | - 53 - |
| Obrázek 59: Detail nádoby s chloroformem .....                               | - 54 - |

|   |        |
|---|--------|
| Obrázek 60: Oplach vzorku C0 v izopropylalkoholu .....                | - 54 - |
| Obrázek 61: Nanášení chloroformu přímo na vzorek C0 .....             | - 55 - |
| Obrázek 62: Vzorek C0 po naleptání.....                               | - 56 - |
| Obrázek 63: Porovnání vzorků G2 a C0 .....                            | - 56 - |
| Obrázek 64: Ochranné pomůcky k lakování.....                          | - 57 - |
| Obrázek 65: Stan na lakování .....                                    | - 57 - |
| Obrázek 66: Základ na plasty ve spreji.....                           | - 58 - |
| Obrázek 67: Zamaskované vzorky po nanesení základu na plasty.....     | - 58 - |
| Obrázek 68: Plnič na plasty .....                                     | - 59 - |
| Obrázek 69: Vzorek G0 po nanesení plniče na plasty .....              | - 59 - |
| Obrázek 70: Použité brusné papíry .....                               | - 59 - |
| Obrázek 71: Stav vzorku G2 po prvním obroušení .....                  | - 60 - |
| Obrázek 72: Stav vzorků po druhém broušení.....                       | - 60 - |
| Obrázek 73: Barva .....   | - 61 - |
| Obrázek 74: Vzorek G2 po nanesení první vrstvy barvy.....             | - 61 - |
| Obrázek 75: Lak.....  | - 61 - |
| Obrázek 76: Vzorek G0 po nanesení první vrstvy laku.....              | - 62 - |
| Obrázek 77: Hotové vzorky G0 a G2 .....                               | - 62 - |
| Obrázek 78: Zamaskovaný vzorek C2 po nanesení základu na plasty ..... | - 63 - |
| Obrázek 79: Vzorek C2 po nanesení první vrstvy barvy .....            | - 63 - |
| Obrázek 80: Hotový vzorek C2 .....                                    | - 63 - |
| Obrázek 81: Porovnání vzorků C1 a C2 .....                            | - 64 - |
| Obrázek 82: Protahovací hoblovka od firmy Panhans.....                | - 65 - |
| Obrázek 83: Srovnávačka od firmy Panhans .....                        | - 65 - |
| Obrázek 84: Formátovací pila PT300M od firmy Rojek.....               | - 66 - |
| Obrázek 85: Spleení prken.....  | - 66 - |
| Obrázek 86: Sestava prken s díly pro uchycení vzorků.....             | - 67 - |
| Obrázek 87: Hotový přípravek se vzorky I.....                         | - 67 - |
| Obrázek 88: Detail vzorku G0 (Stratysys F370) .....                   | - 69 - |
| Obrázek 89: Detail vzorku G2 (Ultimaker 3) .....                      | - 70 - |

|  |        |
|--|--------|
| Obrázek 90: Vzorek C1 (Formlabs Form 3).....                       | - 70 - |
| Tabulka 1: Přehled základních informací o Stratasys F370 [19]..... | - 32 - |
| Tabulka 2: Přehled základních informací o Ultimaker 3 [20] .....   | - 33 - |
| Tabulka 3: Přehled cen materiálu na vzorky .....                   | - 69 - |

Příloha 1: CAD data sestavy přípravku