



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# OPTIMALIZACE DESIGNU PRŮMYSLOVÉ KOMPONENTY VYUŽITÍM METODY KONEČNÝCH PRVKŮ A STROJOVÉHO UČENÍ

DESIGN OPTIMIZATION OF THE INDUSTRIAL PART USING FINITE ELEMENT METHOD AND MACHINE LEARNING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petra Výbohová

## VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Augste, Ph.D.

BRNO 2022

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	<b>Bc. Petra Výbohová</b>
Studijní program:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Augste, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Optimalizace designu průmyslové komponenty využitím metody konečných prvků a strojového učení

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spolu s designem a konstrukcí dílů je v průmyslu stále častější úlohou optimalizace návrhu. Tyto úlohy vyžadují multikriteriální přístup k hodnocení kvality návrhu a míra zlepšení je obvykle závislá na množství času, respektive prostředků investovaných do vytváření dalších a dalších iterací. Práce je zaměřena na počítačovou podporu optimalizace návrhu, a to ve formě propojení existujících nástrojů a postupů tak, aby vytvářely funkční blok, který bude jednoduše použitelný v prostředí Engineering 4.0. Větší transparentnost v tomto procesu a pevně dané postupy ve vytvořeném softwarovém nástroji umožní vytvářet efektivnější studie.

#### Cíle diplomové práce:

Student vypracuje rešerši optimalizace designu a využití 3D tisku v zadané oblasti. Na základě rešerše vybere vhodnou metodu 3D tisku vybraného dílu. V praktické části řešitel zpracuje úlohu, kde porovná vhodnost FDM a SLA 3D tisku. Následně upraví design tak, aby byla zvolená průmyslová součást co nejrychleji a nejlevněji vyrobitelná danou tiskovou metodou v požadované kvalitě. Následně posoudí vliv designových parametrů na cenu nákladů a mechanické vlastnosti. Získané poznatky práce zpracuje ve formě jednoduché aplikace, která odstraní některé stereotypní, avšak nezbytné kroky u podobných úloh v průmyslu. Následně ověří hypotézu, zda a nakolik je možné snížit časovou náročnost na podobné studie designů s využitím zvolených nástrojů, tedy metody konečných prvků a strojového učení, a tím podpořit zavedení Engineering 4.0 v podniku.

**Seznam doporučené literatury:**

Magnier, L., and Haghghiati, F., 2010, "Multiobjective Optimization of Building Design Using TRNSYS Simulations, Genetic Algorithm, and Artificial Neural Network," *Build. Environ.*, 45(8), pp. 736–748.

Owoyale, O., and Pal, P., 2021, "A Novel Machine Learning-Based Optimization Algorithm (ActiVO) for Accelerating Simulation-Driven Engine Design," *Appl. Energy*, 285, p. 116465.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. 8.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Kratochvíl, Ph.D.  
člen fakulty

## **ABSTRAKT**

Objektom skúmania mojej diplomovej práce je optimalizácia pri 3D tlači metódou Fused Deposition Modeling. Cieľom záverečnej práce bolo skúmať vplyvy designových parametrov na cenu či mechanické vlastnosti a prísť na zrýchlený prístup ako skúmať a optimalizovať tvary pre 3D tlač. Práca je rozdelená do 6 kapitol. Obsahuje 80 obrázkov, 12 tabuliek a 4 prílohy. Prvá časť je venovaná teoretickej rešerši optimalizácie, metóde konečných prvkov a metódam 3D tlače. Druhá časť sa venuje porovnaniu 2 metód 3D tlače, analýze rizik a samotnej optimalizácii.

## **ABSTRACT**

The object of research of my master thesis is optimization of 3D print using fused deposition modelling method. The goal of the thesis was to research influence of design parameters and mechanical properties and to come up with way how to research and optimize shapes for 3D print. Thesis is divided into 6 chapters. It contains 80 pictures, 12 tables and 4 attachments. The first part is theoretical research of optimization, finite element method and 3D print method. The second part is about 2 methods of 3D print, risk analysis and optimization.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Optimalizácia, 3D tlač, metóda konečných prvkov

## **KEYWORDS**

Optimization, 3D print, finite element method

## **BLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

VÝBOHOVÁ, Petra. *Optimalizace designu průmyslové komponenty využitím metody konečných prvků a strojového učení*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139541>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Augste.



## **POĎAKOVANIE**

Týmto chcem poďakovať môjmu vedúcemu práce, Ing. Jan Augste Ph.D., za jeho konštruktívnu spätnú väzbu počas tvorby práce, cenný strávený čas pri záverečnej práci. Ďalej ďakujem svojim rodičom za podporu počas štúdia.

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Optimalizácia priemyslovej komponenty využitím metódy konečných prvkov a strojového učenia vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce

V Brne dňa

.....

Petra Výbohová



# OBSAH

<b>ABSTRAKT</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>KLÚČOVÉ SLOVÁ</b> .....	<b>4</b>
<b>KEYWORDS</b> .....	<b>4</b>
<b>BLIOGRAFICKÁ CITÁCIA</b> .....	<b>5</b>
<b>POĎAKOVANIE</b> .....	<b>7</b>
<b>ČESTNÉ PREHLÁSENIE</b> .....	<b>8</b>
<b>OBSAH 1</b>	
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>2 MOTIVÁCIA</b> .....	<b>3</b>
<b>3 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b> .....	<b>5</b>
3.1 Lineárna regresia.....	5
3.1.1 Výpočet Aproximácie priamkou využitím MatLabu.....	8
3.1.2 Obecná lineárna regresia – výpočet Matlab .....	11
3.2 Strojové učenie .....	11
3.2.1 Prístup typu: Lineárna regresia.....	12
3.2.2 Prístup typu: Klasifikácia .....	12
3.3 Typy algoritmov riešenia dátovej optimalizácie.....	13
3.4 Algoritmy pre optimalizáciu design .....	14
3.4.1 Genetický algoritmus (GA) .....	14
3.4.2 Navrhovanie experimentov (DoE).....	15
3.4.3 Optimalizácia krídľom častíc (PSO).....	15
3.5 Metóda konečných prvkov.....	16
3.5.1 Typy MKP metód .....	19
3.6 Porovnanie metód 3D tlače.....	23
3.6.1 Fotopolymerizácia .....	23
3.6.2 Nanášanie tryskaním.....	24
3.6.3 Nanášanie tryskaním pojiva.....	24
3.6.4 Spekanie práškovej vrstvy .....	25
3.6.5 Vytlačovanie materiálu.....	25
3.6.6 Priame nanášanie .....	26
3.6.7 Laminácia .....	26
<b>4 POROVNANIE VHODNOSTI 3D TLAČE</b> .....	<b>27</b>
4.1 Charakteristika metód .....	27
4.1.1 SLA.....	27
4.1.2 FDM.....	28
4.2 Základné porovnanie metód.....	28
4.3 Ekonomické porovnanie .....	30
4.4 Porovnanie usporiadania pracovnej bunky .....	31

<b>5</b>	<b>ANALÝZA RIZIK VYBRANEJ 3D TLAČIARNE .....</b>	<b>32</b>
5.1	Technický popis tlačiarne.....	32
5.2	Identifikácia relevantného nebezpečenstva .....	34
5.3	Zoznam významných nebezpečenstiev .....	35
5.4	Analýza významných nebezpečenstiev .....	35
5.5	Znižovanie rizík.....	35
<b>6</b>	<b>OPTIMALIZÁCIA 3D TLAČE .....</b>	<b>36</b>
6.1	Popis postupu optimalizácie .....	36
6.2	Testovací projekt Benchy .....	37
6.3	Výber komponenty na 3D tlač.....	40
6.4	Legislatíva 3D tlače .....	41
6.5	Agilný vývoj praktickej časti práce .....	42
6.6	Chyby pri 3D tlači .....	46
6.7	3D skenovanie dielov .....	48
6.7.1	Metódy 3D skenovania.....	48
6.7.2	Výber skeneru: EinScan SP.....	49
6.8	Porovnanie 3D scanu s CAD datami .....	52
6.9	Vplyv designových parametrov na cenu nákladov.....	54
6.10	Vplyv designových parametrov na mechanické vlastnosti .....	58
6.11	Aplikácia úpravy designu .....	61
6.12	Overenie hypotézy .....	63
<b>7</b>	<b>ZÁVER.....</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....</b>	<b>69</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV .....</b>	<b>73</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>75</b>

# 1 ÚVOD

Stále častejšou úlohou v priemysle spolu s designom a konštrukciou dielu je optimalizácia návrhu. Tieto úlohy vyžadujú multikriteriálny prístup k hodnoteniu kvality návrhu a miera zlepšenia je obvykle viazaná na množstve času, respektíve prostriedkov investovaných do vytvárania ďalších a ďalších iterácii postupu.

Práca je zameraná na počítačovú podporu optimalizácie návrhu a to vo forme prepojení existujúcich nástrojov a postupov tak, aby vytvárali funkčný blok, ktorý bude jednoducho použiteľný v prostredí Engineeringu 4.0. Väčšia transparentnosť v tomto procese a pevne dané postupy vo vytvorenom softwarovom nástroji umožní vytvárať efektívnejšie štúdie.

Pomocou metódy konečných prvkov si určíme zákonitosti a zároveň overíme hypotézu o gravitácii, kde vychádzame zo zadania, že najväčší priehyb bude v strede komponentu pri lokalizovanej diere vybranej súčasti.

## 2 MOTIVÁCIA

Motivácia práce vychádza z bakalárskej záverečnej práce, kde som sa venovala 3D tlači podvozku modelového autíčka viz. Obr 1. Využívam tak vedomosti o 3D tlači a jej zákonitosti pri 3D tlači vybranej priemyselnej komponenty. V diplomovej práci je uhol pohľadu nastavený na optimalizačnú úlohu.



Obr. 1) Výstup bakalárskej práce

Výstupy z práce boli konzultované externe so záujemcom, ktorý má o prácu záujem a tým pádom sa podieľa na pripomienkovaní a na základe jeho pripomienok, prosieb a nápadov je postavené zadanie diplomovej práce. Zadanie tým pádom predstavuje agilný vývoj a sú aplikované metodológie SCRUM. Agilný vývoj nám napomáha nestratiť hlavnú riešenú problematiku, ale zároveň ostávame flexibilní ohľadom potenciálnych možných zmien, ktoré vieme rýchlo aplikovať.



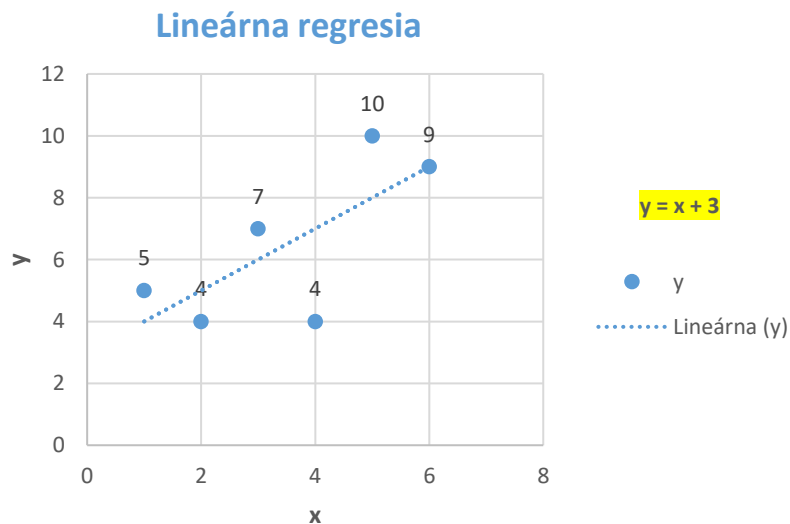
### 3 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

V dnešnej dobe je v priemyselnej praxi čoraz viac prítomné strojové učenie pre riešenia aplikačných úloh obsahujúce množstvo dát. Pri použití tzv. „Surrogate“, (z angličtiny náhradných) metód strojového učenia, ktoré dokážu urýchliť proces simulácie pre aplikáciu spaľovacích motorov, či iné metódy CFD (z angličtiny: „Computer Fluid Dynamics“) aplikácií náročných na výpočtový výkon s veľkým počtom krokov príkazov idúc ruka v ruke s nákladmi na výpočtový priestor v dostupných super počítačoch [1].

V práci sa budeme venovať popisu matematických optimalizačných metód pre riešenie aplikácii na 3D tlačené súčasti ako vstupné dáta do našich modelov lineárnej regresie. Tento prístup je v štatistike považovaný za modelovanie vzťahu medzi skalárnou odpoveďou a viac popisujúcich závislých a nezávislých premenných.

#### 3.1 Lineárna regresia

Podľa uvedenej problematiky môžeme hovoriť o jednoduchej lineárnej regresii v 2D priestore kde máme jednu nezávislú premennú a závislú premennú ( $x$  a  $y$  súradnice kartézskeho súradnicového systému), kde hľadáme lineárnu funkciu. Modelovaný vzťah medzi premennými spojitými je kvantifikovaný lineárnou závislosťou  $x$  na  $y$  ako je napríklad hodnoty teploty ( $y$ ) v siedmych po sebe idúcich dňoch ( $x$ ). Cieľom riešenia problematiky je nájdenie lineárnej rovnice, ktorá spĺňa zadané premenné a okrajové podmienky študovanej problematiky [2].



Obr. 2) Príklad lineárnej regresie priamkou náhodného setu dát  $x$ - $y$ .



Na Obr. 2 vidíme príklad riešenia modelovej úlohy pomocou lineárnej regresie – priamky ako predpisom pre celú množinu bodov. Presnosť priamky medzi bodmi sa určuje pomocou tzv. „errorbarov“, či odchýlky od predpísanej hodnoty ako hovorí rovnica:

$$r_i = y_i - f(x_i)$$

Kde  $r_i$ ...odchýlka,  $y_i$ .. hodnota predpisu priamky,  $f(x)$  reálna hodnota z dátového setu. Pre vyhodnotenie chýb potom využijeme predpis:

$$E = \sum_{i=1}^n |r_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - (a_1 x_i + a_0)|$$

x	y	predpis y	error - absolútny
1	5	4	1
2	4	5	1
3	7	6	1
4	4	7	3
5	10	8	2
6	9	9	0

Tab 1) Hodnoty datasetu s odchýlkami

Po nájdení pomocou lineárnej regresie priamky sa určili predpis  $y$  podľa rovnice a spätne sa dopočítala absolútna odchýlka vo všetkých bodoch viz Tab. 1.

Metódou riešenia problematiky môže byť estimačná numerická metóda najmenších štvorcov ako matematicko-štatistická metóda určená pre aproximáciu preučených sústav rovníc. Hľadáme koeficienty  $k$  a  $q$  tak, aby odchýlky  $\Delta y_i$  boli *minimálne*. Ale zároveň druhým kritériom, že súčet druhých mocnín všetkých odchýlok musí byť minimálny. Použitie druhej mocniny je preto, aby sme dostali kladnú hodnotu a zároveň z hľadiska geometrie sa jedná o štvorec [3].

Lineárna regresia má veľa praktických využití, ale väčšina aplikácií by sa dala rozdeliť podľa cieľa do dvoch nasledovných kategórií:

- **Kategória 1:** cieľom je predikcia (tzv. z angličtiny „forecasting“) alebo redukcia chýb v dátach. Regresia sa tu používa ako prediktívny model na sledované vstupné dáta odpovedí plus okrajové podmienky. Výsledný matematický model potom vracia predikciu na základe vstupných dát a okrajových podmienok.
- **Kategória 2:** vysvetlenie variácie vo výstupných dátach. V tomto prípade lineárna regresia posudzuje kvalitu vzťahu medzi odpoveďou a okrajovými podmienkami, a či majú niektoré vstupné dáta žiadny lineárny vzťah s odpoveďou a zároveň identifikovať sub-sety dát s redundantnou informáciou o odpovedi [4].

Obecně lineární regresi můžeme zapisovat podle funkcí z daných hodnot  $[x_i y_i]$ :

$$y = b_1 f_1(x) + \dots + b_k f_k(x) \quad ()$$

$b_1 \dots$  optimální hodnoty koeficientů regrese z metody nejmenších čtverců

$f_1 \dots$  funkce z daných hodnot  $y = f(x, b_1, \dots, b_k)$

### 3.1.1 Výpočet Aproximace přímkou využitím MatLabu

Funkce polyfit z angličtiny (polynomial curve fitting) vrací koeficienty polynomickejší křivky v ráde tak, aby čo najpresnejšie interpretovala vstupné dáta.

$$[p,S] = \text{polyfit}(x,y,n) \quad ()$$

Príkaz vracia hodnotu štruktúry a slúži ako vstup pre funkciu polyval pre ďalšie spracovanie dát. Funkcia polyval pritom zo vstupných dát vyhodnotí zadaný polynóm pre žiadané hodnoty x.

$$[y,delta] = \text{polyval}(p,x,S) \quad ()$$

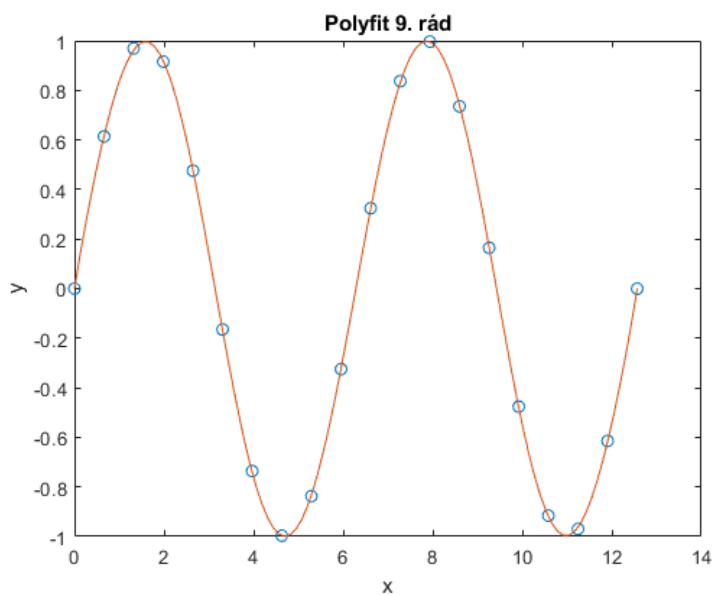
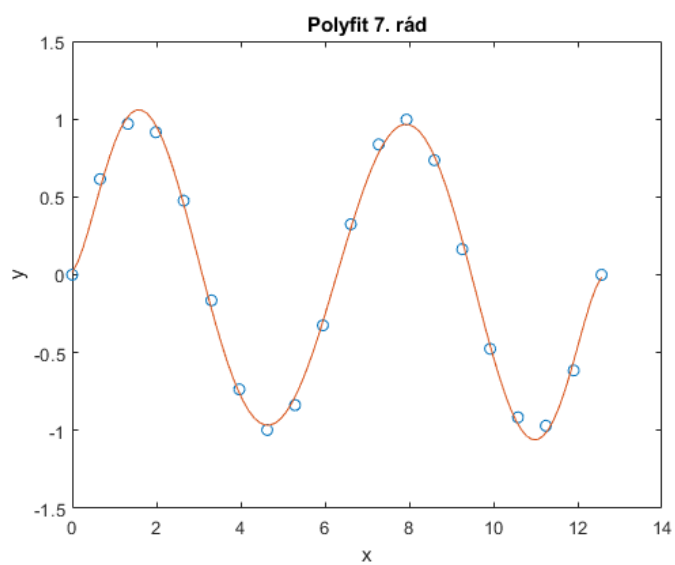
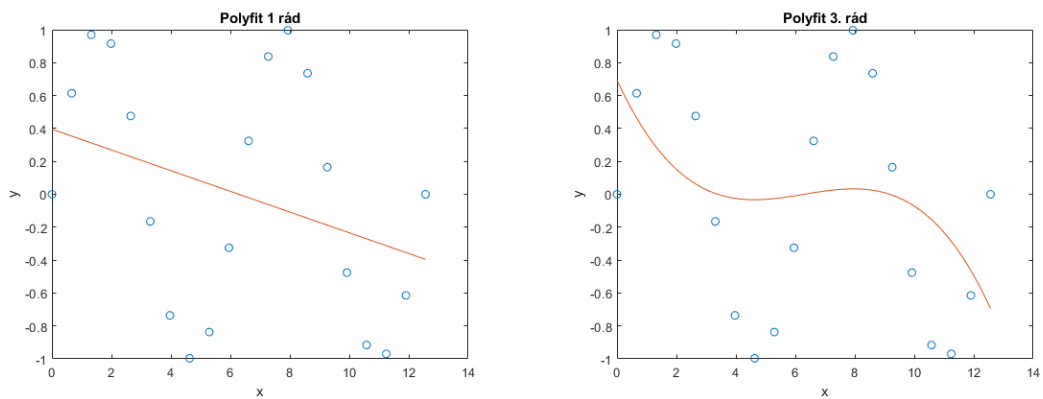
Príklad fungovania je nasledujúci na škále 0-4\*pi vygenerujeme pre x 20 bodov a ako y funkciu sínus. Pomocou riešenia polyfit sme skúsili riešiť regresiú dát postupne polynómami 1,3,7 pre nastavenie polynómami tak, aby opisoval zadanú funkciu sin(x). Obecně teda dokážeme nájsť vhodnú funkciu na to, aby sme popísali zadaný set dát a vyhodnotili jeho charakteristiku priebehu funkcie či oblasti použitia [5].

```
x = linspace(0, 4*pi, 20);
y = sin(x);
p = polyfit(x, y, 9);

x1 = linspace(0, 4*pi);
y1 = polyval(p, x1);
figure
plot(x, y, 'o')
hold on
plot(x1, y1)
hold off
```

Na vyššie uvedenom skripte z programu Matlab môžeme vidieť postupnosť krokov od vytvorenia dátového setu cez použitie polyfit funkcie. Pre jednotlivé riešenia na obrázku dole boli menené rády funkcie – na skripte označené žltou farbou. Najpresnejšie riešenie bolo pri polynóme 9 stupňa.





Obr. 3) Porovnanie riešení aproximácie polynómami 1., 3. 7. 9. stupňa



### 3.1.2 Obecná lineárna regresia – výpočet Matlab

Prvou možnosťou výpočtu je využitie spôsobu cez parciálne derivácie a „kritérium S“, pre ktoré musí platiť, že všetky parciálne derivácie kritéria podľa týchto koeficientov musia byť rovné nule. K riešeniu sa využije jedna z metód riešenia sústavy lineárnych rovníc. Tu musíme najskôr sústavu vyhodnotiť cez Frobeniovu vetu a určiť tak jej hodnotu a potom pre výpočet neznámych použijeme napríklad Gaussovú eliminačnú metódu [5].

Vyššie uvedená problematika je bez využitia výpočtovej techniky zdĺhavá a preto sa za využitia programu MatLab, kde je vstupom rovnica s neznámymi parametrami:

$$Ax = b$$

Pričom: A= matica f(x), x =vektor neznámych, b = vektor pravých strán rovníc

V programe môžeme použiť miesto komplikovaných metód riešení sústav iba delenie alebo použiť ekvivalentnú funkciu MLDIVIDE ako ekvivalentné riešenie.

$$x = A \setminus b$$

$$x = \text{mldivide}(A,b)$$

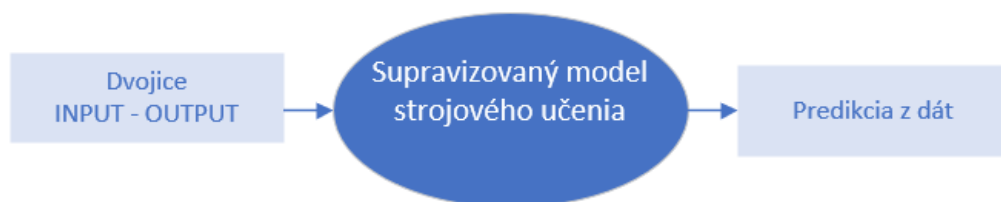
### 3.2 Strojové učenie

Dôležitú úlohu pri vývoji strojového učenia hrajú práve modely lineárnej regresie a matematické princípy, ktoré položili základy umelej inteligencie. Lineárne regresný algoritmus je jeden zo základných algoritmov typu z angličtiny (tzv. „supervised machine learning“) vďaka relatívnej jednoduchosti teórie a vlastností ktoré boli už známe odbornej verejnosti.

Lineárna regresia dosiahla aj dominantnú empirickú úlohu v ekonomike ako nástroj rýchlej predpovede spotreby či nákladov do budúcnosti alebo v oblasti finančného investovania do fondov či ponuka a dopyt práce na trhu [7].

Základným pojmom v oblasti strojového učenia je model. Model predstavuje definovaný aplikačný problém pre daný riešič programu, ktorý pre strojové učenie využívame napríklad program KNIME. Jednotlivý model sa rozdeľuje na tzv. „supervised“ a „unsupervised“ z angličtiny s a bez dohľadom.

Supravizované učenie zahŕňa sériu funkcií, ktoré mapujú vstup a výstup dvojíc do modelu. Na základe vstupných dát vieme napríklad predpovedať postupný nárast veľkosti oblečenia závisiacom na veku, či množstvo spotrebovaného oleja v osobnom automobile pri najbližších x kilometrov [8].

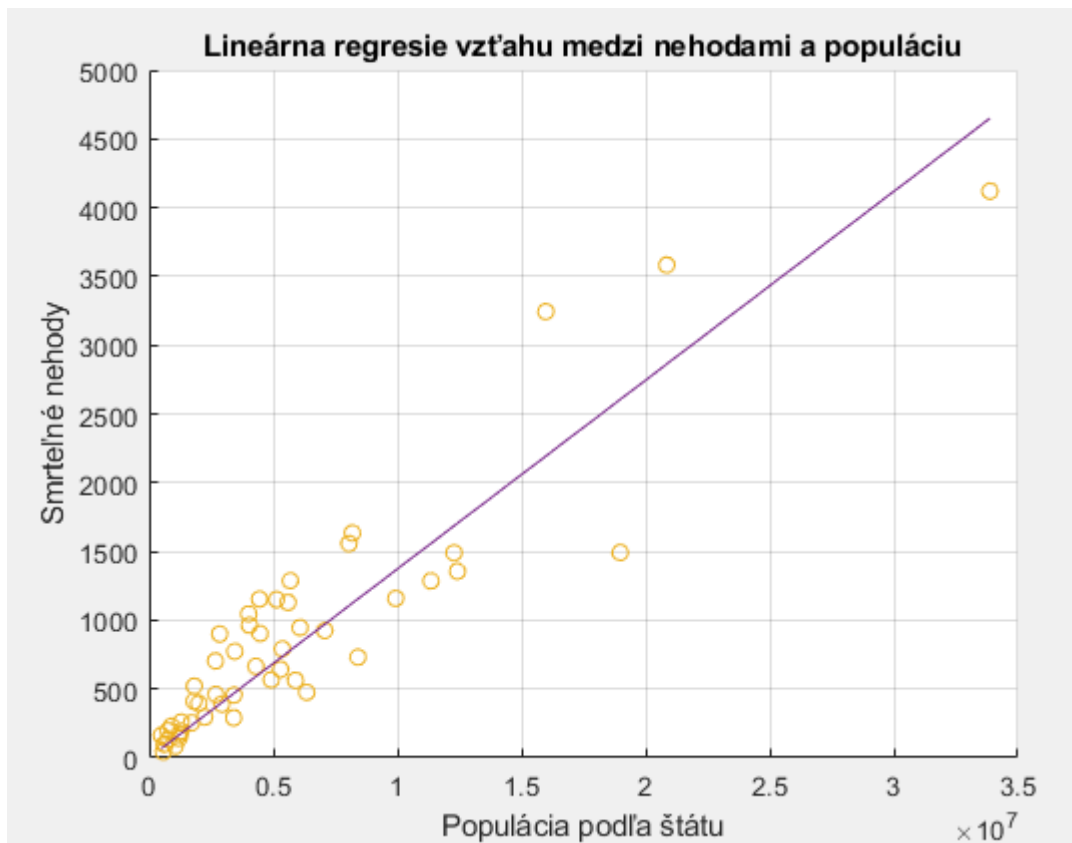


Obr. 4) Vizualizácia modelu strojového učenia.

Pre supravizované modely strojového učenia existujú dva prístupy pre stavbu riešenia:

### 3.2.1 Prístup typu: Lineárna regresia

- Regresný model: vzťahy medzi závislými a nezávislými premennými, výstup je pritom kontinuálny,
- Subtypy:
  - Viacnásobný lineárny model – využitie priamok pre popis dát
  - Polynomický – hľadanie krivky aby popísala závislosť dátového setu
  - Rozhodovací strom,
  - Náhodný les,
  - Neurónová sieť [8].



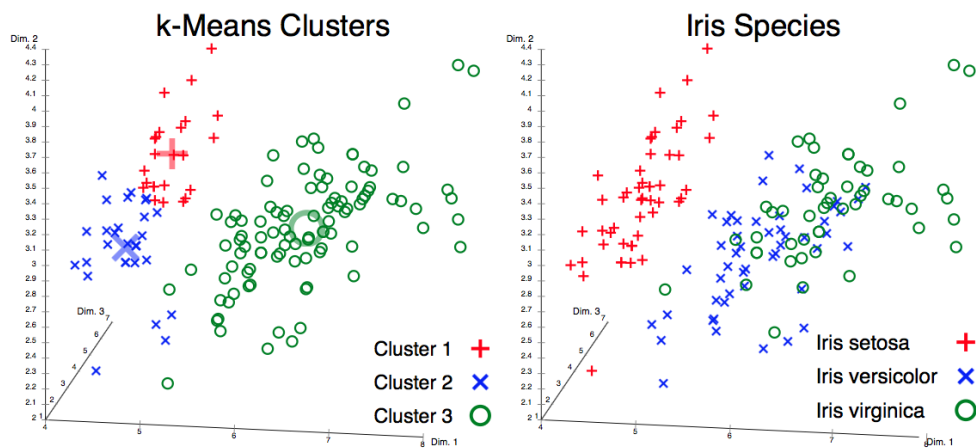
Obr. 5) Príklad lineárneho Modelu regresnej analýzy v programe Matlab.

### 3.2.2 Prístup typu: Klasifikácia

- Oproti prvému typu je výstup z klasifikácie diskretný.
- Subtypy:
  - Logická regresia – konečný počet výstupov – 2,
  - Podporný Vektorový stroj
  - Naivný Bayes
  - Neurónové siete

Nesupravizované učenie sa spočíva v tom, že zo vstupných dát hľadáme vzťahy na výstupné značené dáta použitím rôznych metód. Prvá metóda je klastrovanie, kde podobné sa označia skupinovo napríklad všetky jablká v rámci celého ovocia a zeleniny obchodu. Druhý typ učenia sa je redukcia rozmerov v našom dátovom sete elimináciu alebo extrakciu.

Využívaná metóda sa nazýva analýza hlavných komponent (z angličtiny „Principal Component analysis“), ktorou sa odporúča začať skoro každú viacrozmernú úlohu. V teórii signálov transformácie slúži k dekorelácii dát a využívame ju k zníženiu dimenzie s čo najmenšou stratou informácie. Je to prepísanie vstupných hodnôt, v maticovom tvare, do výstupných v inej súradnicovej sústave [8,10].



Obr. 6) Klastrovanie dát (vľavo) K -stredné hodnoty, (vpavo) reálne druhy kvetu Iris [8].

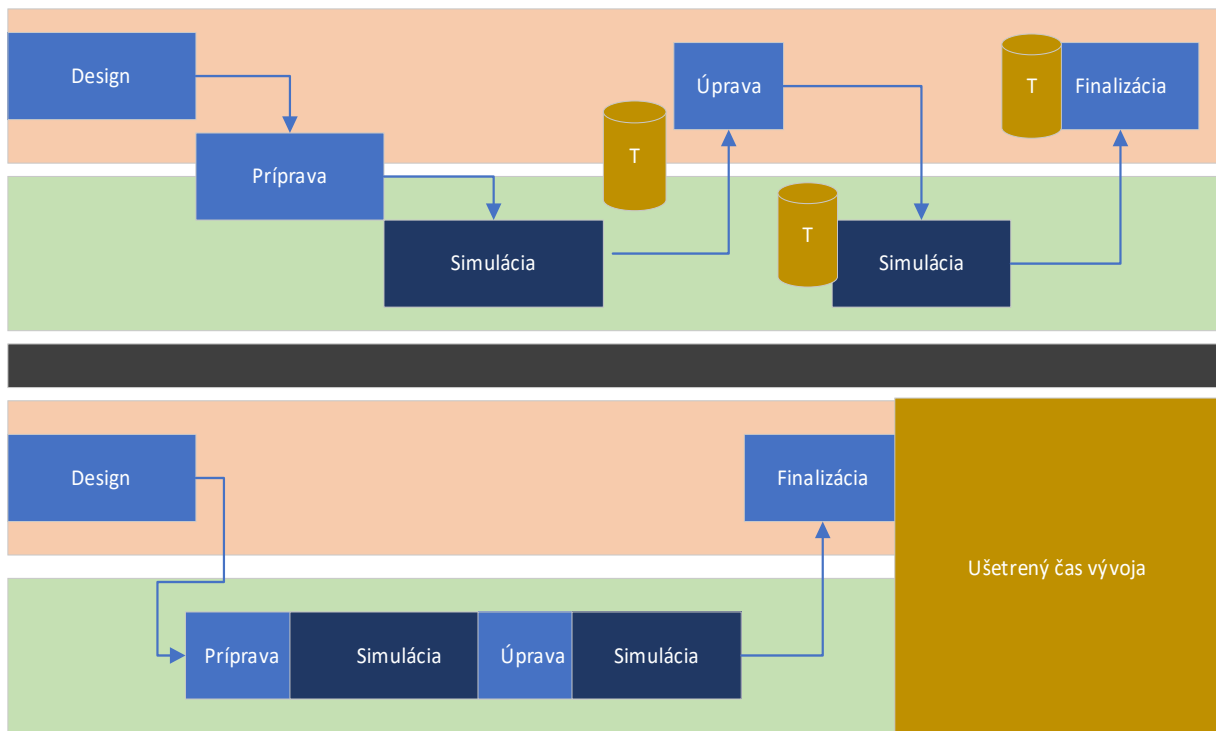
### 3.3 Typy algoritmov riešenia dátovej optimalizácie

V praxi vzniká viac a viac aplikácií na využitie strojového učenia a modelov popisujúcich zložitú komplexnú úlohu ako napríklad turbulentné prúdenie, biologické aplikácie topologickej optimalizácie či motor so vnútorným spaľovaním.[1]

Pri riešení komplexných úloh rastie cena bežiacieho výpočtu, učenie sa z chýb a dôležitosť pochopeniu dát. Používanie tzv. Simuláciou riadenú optimalizáciu dizajnu, ktorá má potenciál minimalizovať náklady (z angličtiny „Simulation driven design optimization“).

Program Ansys a jeho modelér Spaceclaim tvrdia, že použitím prípravy a úprav počas simulácie, vedia optimalizovať hodnotový reťazec zoskupením skupín vývoja a tak šetriť približne 1/3 potrebného času na vývoj nového stroja. Eliminuje tak straty v reťazci a rastie tak návratnosť pôvodnej investície [11].

Na nasledujúcom obrázku Obr.7 môžeme vidieť vizualizáciu vývoja. V prvom prípade sa jedná o neoptimalizovaný proces so stratami označených „T“ na žltých poliach. V porovnaní s optimalizovaným prípadom nižšie na obrázku vidíme priamo ušetrený čas na osi bez strát v procesoch a simulovaním výrobného cyklu pri návrhu nových výrobkov firmy.



Obr. 7) Porovnanie časov optimalizovaného (dole) a neoptimalizovaného (hore) konštrukčných a simulačných dejov [11].

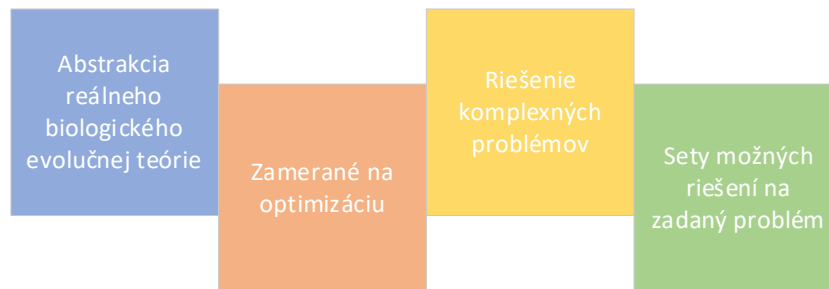
### 3.4 Algoritmy pre optimalizáciu design

Problematika simulácii prináša viaceré možnosti výberu riešení z angličtiny „Software in the loop“, teda v prípade kde naším zameraním je software. Pre simulácie z oblasti prúdenia sú veľmi časovo náročné podobne aj simulácie namáhania pre veľké zostavy či veľmi jemnej mriežky a tak zvolených prvkov Metódy konečných prvkov (ďalej „MKP“) analýzy. V minulých štúdiách pre aplikáciu motora boli využité nasledovné viaceré metódy optimalizácie.

#### 3.4.1 Genetický algoritmus (GA)

Algoritmus vychádza z abstrakcie biologickému systému evolučnému prežitiu najschopnejších generácií a to napríklad ak máme 2 typy oviec, ktoré sú ohrozované nebezpečným predátorom, prežijú šikovnejšie kusy, ktoré majú možnosť sa potom ďalej rozmnožovať a aj mutovať. Toto môžeme analogicky povedať o vývoji generácií dátových setov, kde sa týmto princípom hľadá optimum funkcie a na obrázku č. 8 môžeme vidieť základnú charakteristiku metódy.

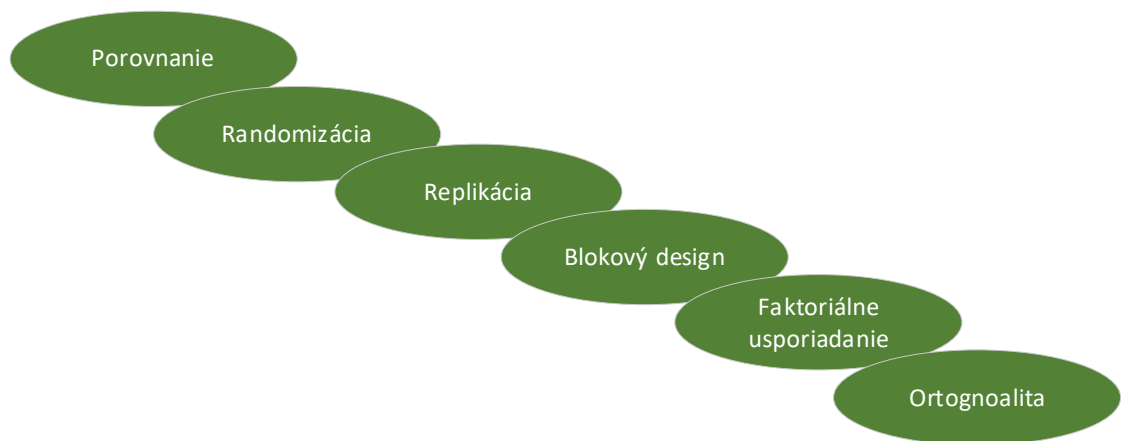
Na algoritme beží malá dávka CFD simulácii na báze predošlých úspešných „generácií“ iterovania. Dizajn s dominantným priebehom funkcie sú uprednostňované nad funkciami s nedominantným „vágny“ priebehom. Dosahuje vyššiu presnosť ako DoE, ale zaberie jej dlhší čas kým skonverguje do optima hľadanej funkcie. [1,12]



Obr. 8) Kľúčové vlastnosti a popis Genetického algoritmu

### 3.4.2 Navrhovanie experimentov (DoE)

Pod anglickou skratkou DoE sa skrýva pojem z angličtiny („Design of Experiments“). Patrí sem práca s experimentálnym spôsobom ako súčasť matematickej štatistiky, ktorá sa zaoberá analýzou a zberom dát a pokusmi. Dôležitou časťou experimentu je aj intervencia, kde nás zaujíma efekt intervencie a správanie našej sledovanej zostavy. Hlavné komponenty sú ako je znázornené na obrázku 9:



Obr. 9) Fázy algoritmu DoE [13].

Využíva techniku priestorového doplnovania pre prebádanie povrchu. Paralelne bežia naraz viaceré simulácie. Rozpoznávajú len lineárne vzťahy, ktoré potom vedú k strate presnosti [1].

### 3.4.3 Optimalizácia krdľom častíc (PSO)

Z angličtiny „Particle Swarm Optimizacion“ je technika umelej inteligencie inšpirovaná správaním sa krdľom vtákov pri hľadaní potravy. Všetky častice majú definovanú polohu, rýchlosť a pamäť predchádzajúcich „úspešných lovov“. Celý algoritmus v diskretných časových krokoch bez prestávky upravuje hodnoty popisujúce častice.

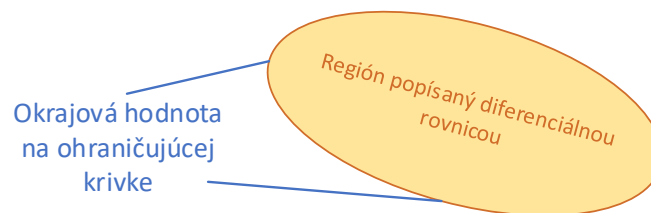
Algoritmus sa v svojom popise odkazuje na verziu Standard PSO 2007. Aby algoritmus neskĺzol do riešenia v lokálnom optime a preskúmal celú danú plochu. Tu máme definovaný pomer explorácie ku eksploatacii, pričom explorácie sú definované vtedy, keď sa častica pohybuje v tesnom okolí už navštívených bodov a explorácia sú zvyšné ešte nenavštívené plochy. Nevýhoda tohto postupu je využívanie veľkých jednotiek, ktoré nedostatočne prebádajú povrch, je nutné zvoliť vhodnú veľkosť jednotiek [1, 12, 14].

### 3.5 Metóda konečných prvkov

MKP je všestranná numerická metóda, ktorá podľa diferenciálnych rovníc definovaných v tzv. konečných prvkov rieši problematiku inžinierskeho prístupu k formovaniu matematického modelovania v týchto aplikačných sférach:

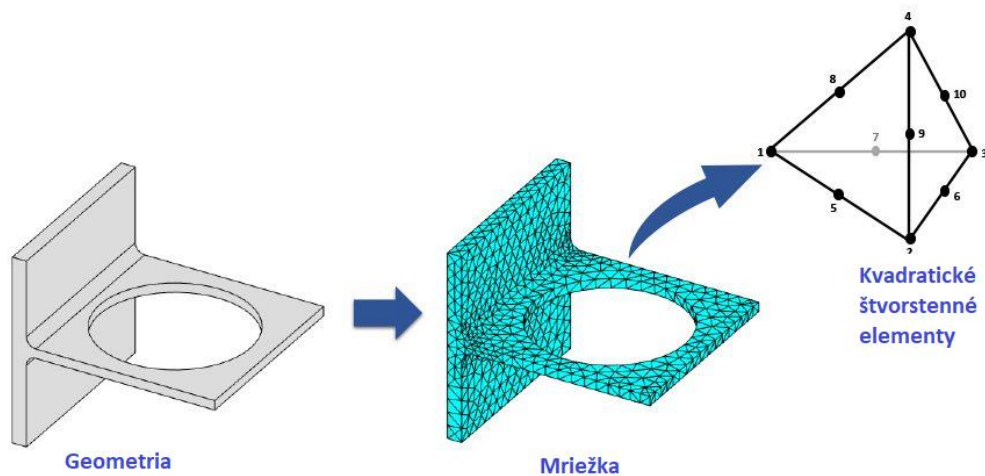
- Štrukturálna analýza,
- modálna analýza,
- problematika prúdenia kvapalín,
- elektromagnetická problematika,
- modelovanie difúzií a vibrácií
- akustika.

Pomocou numerických metód sme schopní riešiť parciálne diferenciálne rovnice v dvoch alebo troch priestorových premenných (napríklad v niektorých okrajových problémov ako je na Obrázku 10).



Obr. 10) Okrajový problém hodnôt.

Principiálne sa problematika rieši tak, že vychádzajúci objem / teleso alebo zostavu delíme na malé časti nazývané elementárne. Deje sa to cez diskretizáciu v priestore, ktorá je zhotovená na základe mriežky objektu. Mriežka sú pravidelné jednoduché útvary ktoré delia objem na elementárny znázornených na Obr.11. V týchto elementárnych plochách prebieha výpočet ako systém algebraických definovaných rovníc [16].



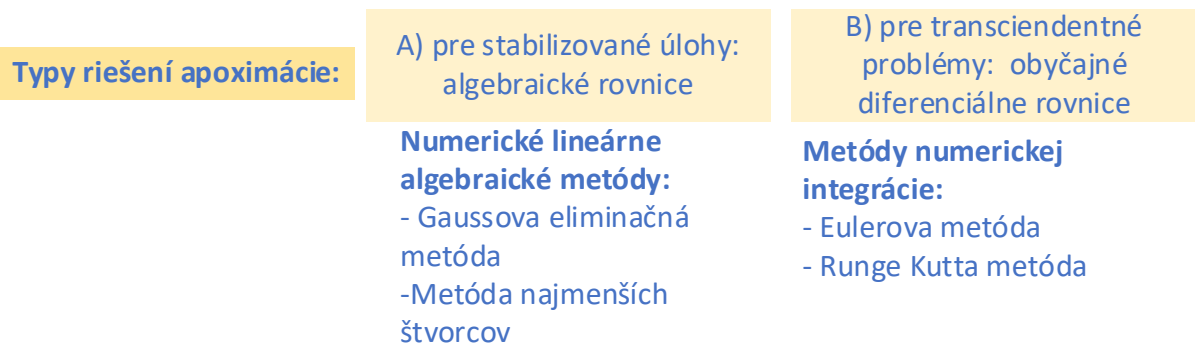
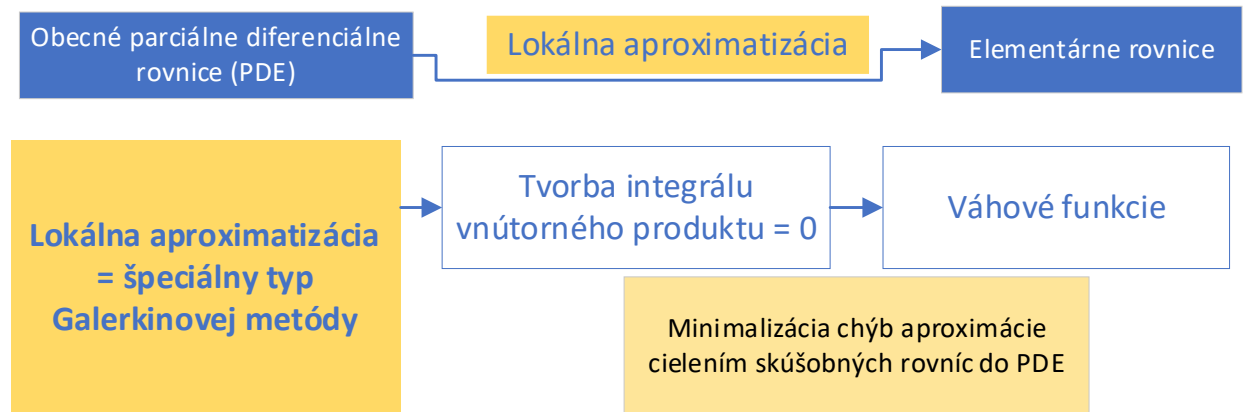
Obr. 11) Diskretizácia objemu telesa na konečné elementy v tvare štvorstenu [15].



Typický proces práce zahŕňa:

1. Rozdelenie problému na kolekciu menších častí, pričom set elementárnych rovníc je definovaný pre každý element zvlášť.
2. Systematickú rekombináciu všetkých setov rovníc na elementárnej úrovni späť do globálneho súradnicového systému pre finálnu kalkuláciu a zobrazenie výsledkov.

Pre prvý krok si metódu môžeme predstaviť nasledovne:



Obr. 12) Popis riešenia problému na elementárnej úrovni cez numerický prístup [17].

Dôležitým prvkom je samotné generovanie mriežky a využitá tzv. diskretizačná stratégia. Skladá sa z troch krkov ako môžeme vidieť na Obr. 13.



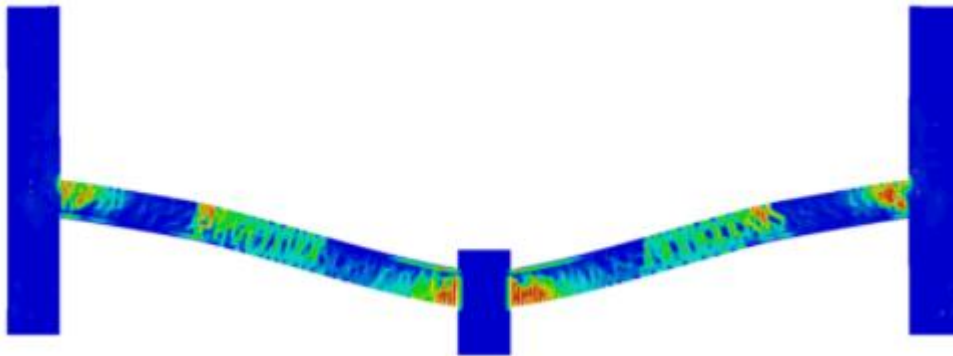
Obr. 13) Diskretizačná stratégia generovania mriežky [17].



### 3.5.1 Typy MKP metód

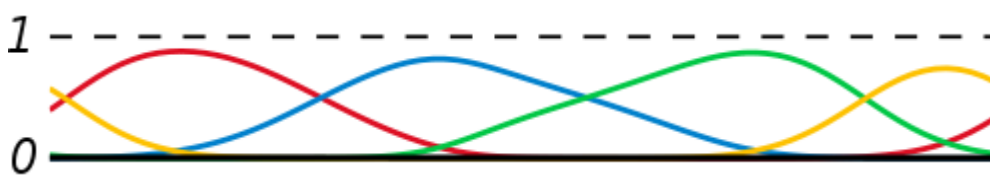
Prístupy k problematike konečných prvkov sa líšia a z hľadiska matematiky existuje niekoľko prístupov:

**AEM metóda** je aplikovaná elementárna metóda. Zakladá si na kombinácii diskkrétnej elementárne metóde a MKP. Je to numerická analýza využívajúca kontinuálne aj diskkrétne správanie štruktúr. Metóda automaticky sleduje štrukturálny kolaps materiálu počas všetkých častí cyklického namáhania. Oproti MKP sú elementárne telieska spojené sériou nelineárnych pružín, ktoré reprezentujú vlastnosti materiálu znázornená na Obr. 14 [18].



Obr. 14) AEM metóda jej vizuálne znázornenie [18].

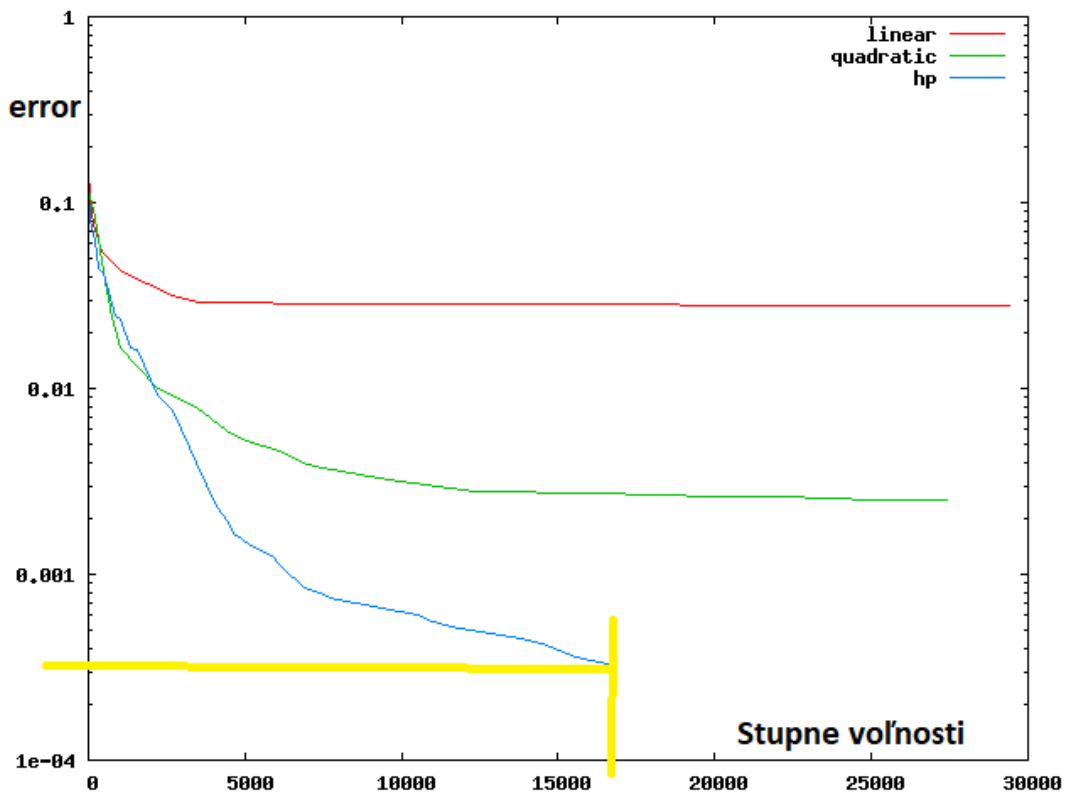
**Generalizovaná MKP metóda** definuje lokálne miesta pomocou funkcií tak, že reflektuje nad dosiahnutými informáciami o neznámom riešení a dosahuje tak dobrú lokálnu optimalizáciu. Potom rozdelenie jednoty sub-povrchy riešenej plochy pomáha zjednotiť všetky podoblasti. Principiálne môžeme zjednotenie ukázať na príklade 4 kružníc rozvitých po osi, znázornenej na Obr.15. Vrchná čiarkovaná osa potom naznačuje súčet všetkých kružníc. Efektivita metódy ale prichádza s problémami na mikro škálovaní aj problémy s riešením na okrajových vrstvách.



Obr. 15) Zjednotenie štyroch kružníc PUM metóda.

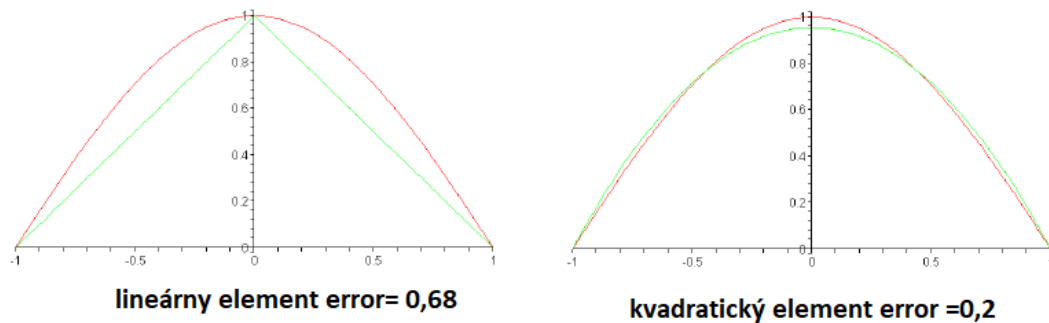
**Zmiešaná MKP metóda** patrí k hybridným metódam numerického riešenia. Pri riešení je nutné zadať vstup v parciálnych diferenciálnych rovniciach Lagrange multiplikátor pri definovaní problematiky. Využíva sa tam kde zlyháva klasická MKP napätie na nestlačiteľnom elastickom telese. Výsledky metódy tvoria sadlový systém s negatívnymi hodnotami, kde vzniká nedefinitná matica, ktorá komplikuje riešenie. V praxi sa na nedefinitnú maticu využívajú špeciálne riešiče, ktorých výstupom je 2x2 bloky diagonálnych matic ako čistá LL Choleského dekompozícia pozitívne definovaných symetrii. Negatívum metódy je náročnosť riešenia na pamäť.

**HP- MKP metóda** je numerická metóda pre riešenie PDR založená na kusových polynomičkých aproximáciách pričom elementy sú polynómy stupňa ( $p$ ) a variabilnej veľkosti ( $h$ ). Princíp metódy spočíva na fakte, že MKP metóda konverguje exponenciálne rýchlo, ak je mriežka vhodnou kombináciou  $h$ - a  $p$ - upresneniami deliac elementy mriežky na menšie a zároveň zvyšovanie stupňa polynómu. Pre adaptívne MKP programovanie existuje štandardný projekt na posúdenia – Ficherov problém, ktorý tvorí neúplnú kocku, Exaktné riešenie má singulárny gradient v strede kocky (analógia nekonečného napätia). Pomocou tejto vedomosti vieme numericky vykalkulovať aproximačné riešenie tak, aby sme porovnali chybu rôznych metód. Na grafe práve pomocou z angličtiny „degree of freedom“ stupňov voľnosti vieme určiť veľkosť matice tuhosti. Konvergencia metódy je v hp forme rýchlejšia a konverguje pri cca 17000 stupňov voľnosti s presnosťou chyby v rádoch tisícín znázornené na Obr. 16 [19].



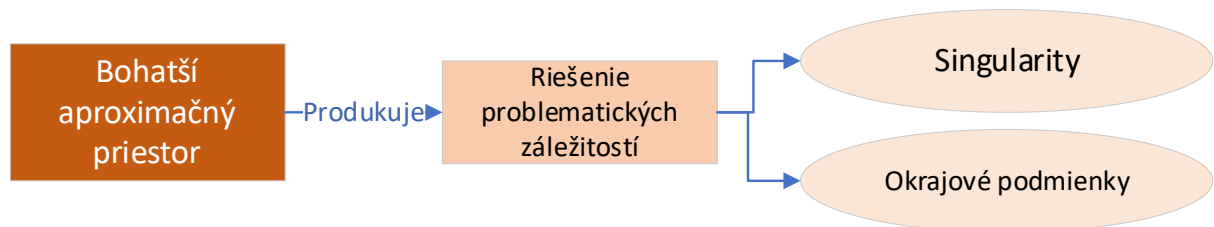
Obr. 16) Konvergencia lineárnej, kvadratickej a hp- MKP metód na Ficherovom probléme [19].

Presnosť hp metódy je vysvetliteľná na 1D Poissnovej rovnice s nulovou Dirichletovou podmienkou pre 2 rôzne mriežky: vľavo na Obr.17 sú použité 2 lineárne a kvadratický element.



Obr. 17) Chybovosť metód podľa tvaru elementu [19].

**X MKP metóda** vzniká z generalizovanej MKP metódy a teórie zjednocovania z angličtiny „partition unity method“. Klasickú MKP metódu prekračuje tak, že v riešení je priestor na výsledky diferenciálnych rovníc s nekontinuálnymi funkciami. Princíp metódy je načrtnutý na Obr.18.

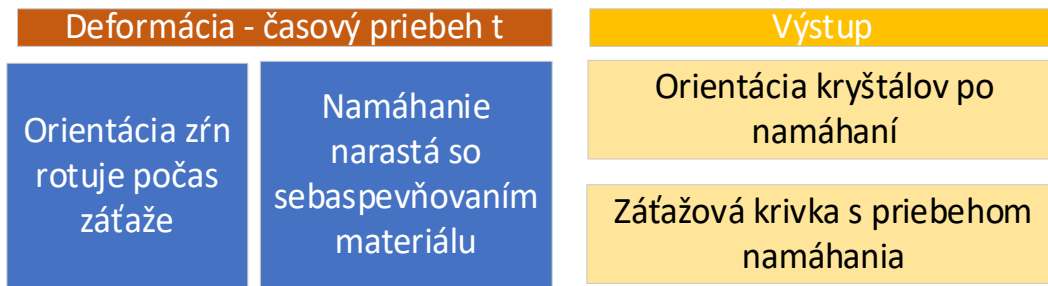


Obr. 18) Princíp fungovania riešení X MKP metódy.

Výhodou metódy je fakt, že v priebehu výpočtu nie je treba objekt mriežkovať viackrát a pomocou 1 mriežky prebehne celý výpočet. Šetria sa tak náklady výpočtu a klesá chybovosť. Metóda rýchlo konverguje a dosahuje solídnu presnosť.

**Plasticita kryštálov MKP metóda** je pokročilý numerický nástroj z angličtiny „Crystal Plasticity FEM“, z čoho je skratka CPFEM vynájdený Franzom Rotersom. Principiálne kovy môžu zobrazené ako kryštály s ich typickou anizotropiou, či zobrazenie priamo namáhania. Jeden kryštál má teda špecifikovaný typ mriežky: BCC, FCC, HCP aby odpovedalo namáhaniu. Priebeh namáhania je detailne zobrazený na Obr.18 [20].

**Metóda virtuálneho elementu** je rozšírenie kvalitatívnej numerickej metódy na riešenie vlastností kontinua, kde kontinuum aproximujeme a riešime miesto parciálnych diferenciálnych rovníc problematiku diskretnú. Ďalším rozšírením je rozšírenie konečno diferencných metód ( z angličtiny „Mimetic Finite Difference method“, ďalej MFD). Jedná sa o metódu, pri ktorej generalizujeme štandardný konečný prvok elementov so svojvoľnou geometriou. Riešenie je založené na všeobecných polynómoch (v 3D priestore m) nepravidelné a nekonvexné tvarom. Virtuálna metóda je preto, lebo nepoznáme tvar lokálnej bázeovej funkcie, ktorý nie je nutný ku výpočtu [21].



Obr. 19) Priebeh namáhania a výstupné parametre CPFEM metódy



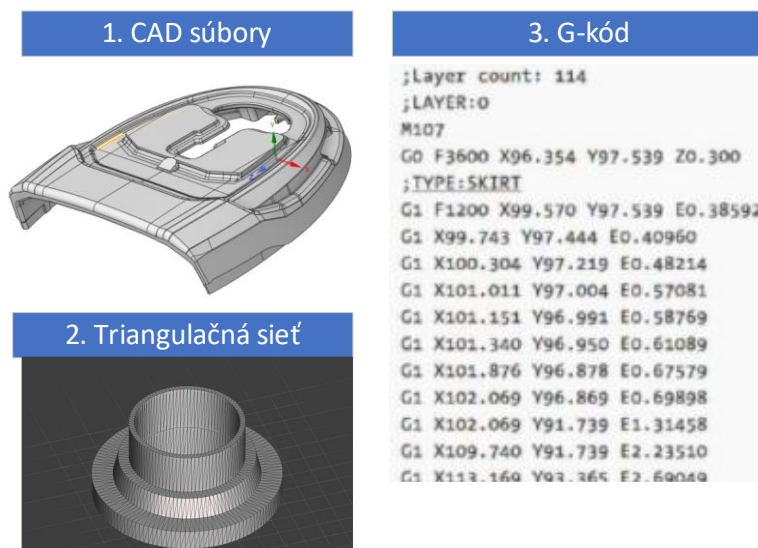
Obr. 20) Tvary elementov pre virtuálnu elementárnu metódu [22].

Kľúčová myšlienka metódy by mohla byť sumarizovaná nasledovne:

- Testovacie funkcie obsahuje každý element, pričom polynomicke funkcie sú rádu  $\leq k$  plus ďalšie nepolynomicke funkcie.
- Pri výpočte na úrovni elementu sa lokálna matica tuhosti sú polynomicke do stupňa  $\leq k$ . Stupne voľnosti sú starostlivo vybrané tak, aby nám dovoľovali spočítať exaktný výsledok použitím iba stupňov voľnosti z iného vstupu nepolynomickeho spôsobu.
- Zostávajúca časť lokálnej tuhosti v bi lineárnej forme, keď nepolynomicke stretne iného nepolynomickeho, potrebujeme vyprodukovať výsledok so správnym rádom veľkosti a vlastností stability [21].

### 3.6 Porovnanie metód 3D tlače

Posledné roky sa medzi nadšencami techniky prudko rozšírilo vlastníctvo 3D tlačiarne. Metóda 3D tlače spočíva s prácou zo zásobných materiálov, ktorý privádzame do iného skupenstva tak, že pomocou súradníc v danom súbore trasujeme a nanášame po vrstvách. Príprava spočíva v 3 krokoch znázornené na Obr. 21. Na trhu ale existujú viaceré metódy ako z G-kódu dostať hotový diel. Materiál dielu, ktorý sa tlačí sa delí na: materiál podpory a súčasti. Súčasť leží na podpornom materiáli, ktorý „vyladí“ a pomôže s bezproblémovou tlačou komponenty.

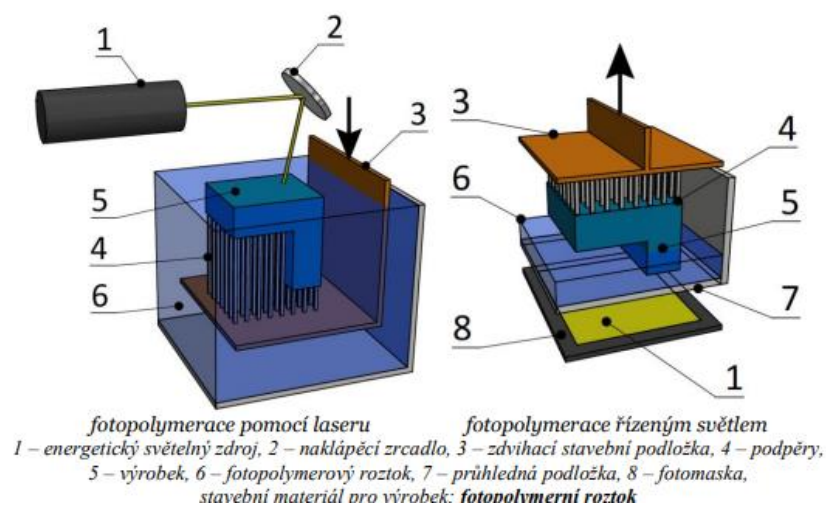


Obr. 21) Postup prípravy modelu na 3D tlač.

Technológia 3D tlače je aditívna technológia, ktorá sa delí do viacerých oblastí podľa rôznych kritérií. Podľa použitého materiálu sa delia na: tekutiny, práškové materiály (natavenie, spekanie a pevné materiály (kovy, plasty, sklo, vosk, ...).

Zásadné rozdelenie je však podľa technológie vymedzené normou ČSN EN ISO 17296-2:2017, ktorá definuje 7 typov aditívnej technológie:

#### 3.6.1 Fotopolymerizácia

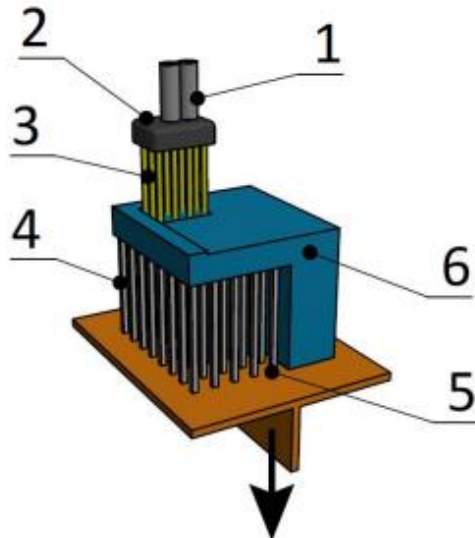


Obr. 22) Aditívna výroba fotopolymerizáciou [23].



Zdrojom svetla metódy je laser alebo riadený zdroj svetla. Budúcu súčasť sa v laserovom prevedení posúva dole v rámci osy z. Do fotopolymerného roztoku po vypálení vzoru na fotopolymerný roztok.

### 3.6.2 Nanášanie tryskaním

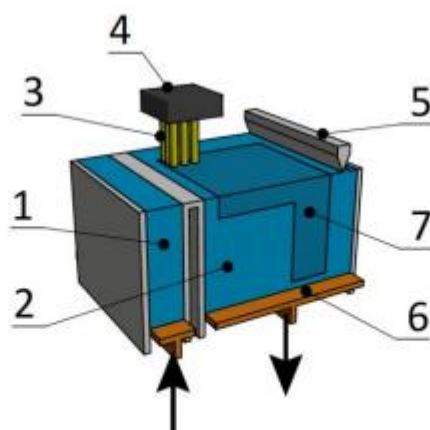


1 – zdvihací tisková hlava pro podpurný a stavební materiál, 2 – UV lampa, 3 – kapky stavebního materiálu, 4 – podpěry, 5 – zdvihací stavební podložka, 6 – výrobek stavební materiál pro výrobek: **fotopolymerní roztok, vosk**,

Obr. 23) Aditívna výroba nanášaním tryskaním [23].

Trysková hlava nesie podpurný aj stavebný materiál. Jeho kvapky tvoria jednotlivé vrstvy tak, že roztavený vosk ide cez UV lampu, ktorá dodá potrebné mechanické vlastnosti výrobku. Stavebná podložka sa vždy po nanosení vrstvy posúva smerom nadol v rámci osy z.

### 3.6.3 Nanášanie tryskaním pojiva



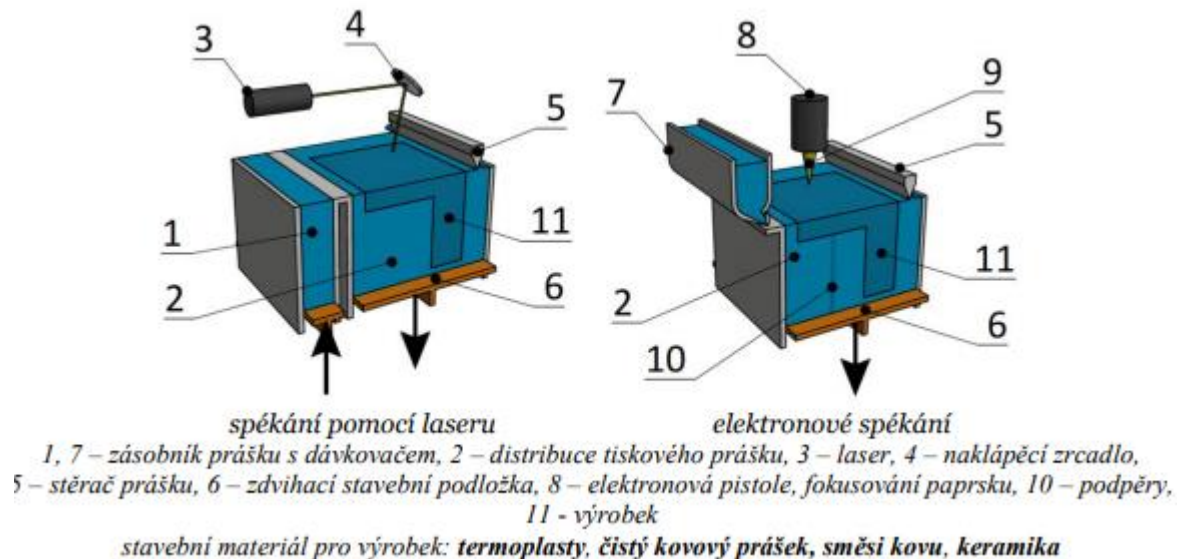
1 – zásobník prášku s dávkovačem, 2 – distribuce tiskového prášku, 3 – kapalné pojivo, 4 – tisková hlava s dávkovacím zařízením pojiva, 5 – stěrač prášku, 6 – zdvihací stavební podložka, 7 – výrobek stavební materiál pro výrobek: **kovový prášek, směsi kovu a kapalné pojivo**

Obr. 24) Aditívna výroba tryskaním pojiva [23].



Tlačový prášok je uložený v zásobníku. Podložka zásobníku sa posúva nahor a prepádajúce pojivo si zoberie stierač prášku v pravidelných intervaloch. V pracovnom priestore máme tlačovú hlavu, ktorá nanáša zmes pojiva a nadbytočné pojivo zotrie stieračom prášku z plochy a celá zdvíhacia plošina sa posunie dole v rámci osy z.

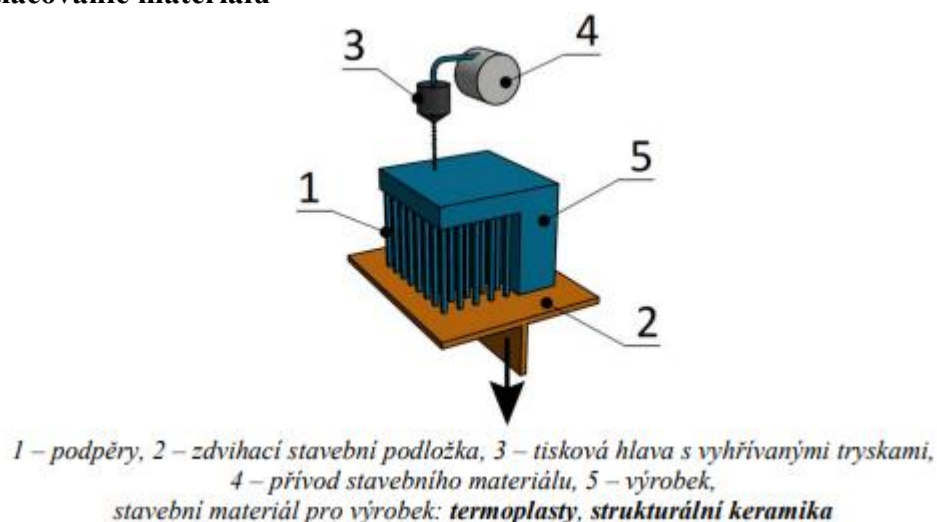
### 3.6.4 Spékanie práškovej vrstvy



Obr. 25) Aditivna výroba spekaním práškovej vrstvy [23].

Sú dva prístupy podľa zdroja a to: tavenie laserom alebo elektrónové spekanie. Metóda sa podobá na aditívnu metódu tryskaním pojiva až na chýbajúcu trysku, ktorá je tu nahradená laserom a naklápacím zrkadlom tak, že prevzala jeho funkciu. Metóda vpravo na Obr.25 je príkladom využitia elektrónovej pištole a zásobníka, pričom elektrónová pištoľ vypaľuje vzor.

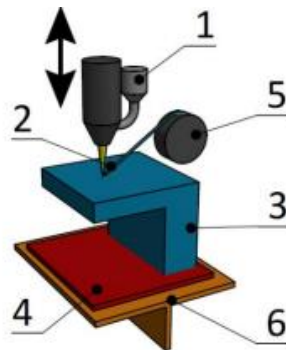
### 3.6.5 Vytlačovanie materiálu



Obr. 26) Aditivna výroba vytlačovaním materiálu

Celý proces začína tavením filamentu, ktorý je natočený v kruhovej nádobe. Ďalej prechádza materiál cez studený a teplý koniec extrúdera = tlačovej hlavy. Roztavený plast sa nanáša na povrch vrstvu po vrstve. Zdvíhacia plošina sa po každej vrstve posúva smerom nadol.

### 3.6.6 Priame nanášanie

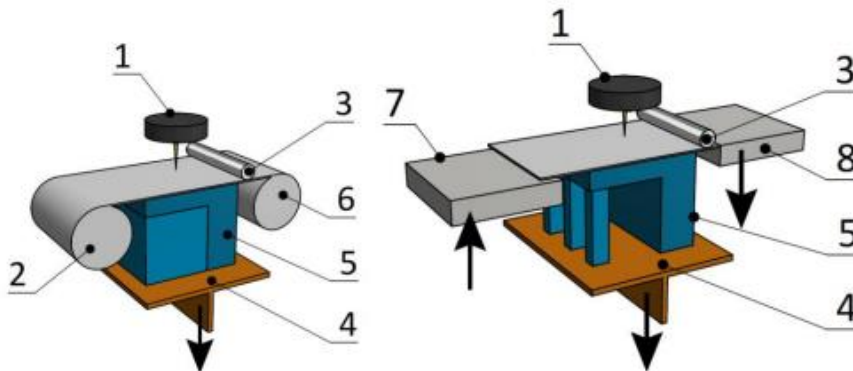


1 – násyпка na prášek, 2 – energetický paprsek (laser, elektron, plazma), 3 – výrobek,  
 4 – tisková podložka, 5 – cívka s drátem (vláknem), 6 – zdvihací stavební podložka  
 stavební materiál pro výrobek: **kov, keramika**

Obr. 27) Aditivna metóda priame nanášanie [23].

Do energetického paprsku vstupuje prášok kovu či keramiky. Po natavení sa zmiešava spolu s filamentom v drôtenej forme. Po dokončení vrstvy sa fixná plošina posúva nadol. Pohyb po vrstvách vytvára paprsok.

### 3.6.7 Laminácia



stavební laminát je v roli                      stavební laminát je v plátech  
 1 – řezací zařízení, 2 – zbývající laminátový materiál, 3 – laminátovací válec, 4 – zdvihací stavební podložka,  
 5 – výrobek, 6 – laminátová surovina, 7 – zásobník zbývajícího laminátového materiálu,  
 8 – zásobník laminátové suroviny  
 stavební materiál pro výrobek: **papír, kovová folie, polymerové nebo kompozitové listy,**

Obr. 28) Aditivna výroba Laminácia [23].

Pri metóde lamináciou sa materiál nanáša buď z roli alebo v plátoch. Celý proces výroby spočíva na rezaní materiálu tak, že sa vyreže konkrétny vzor a zvyšok materiálu sa neroluje na druhý valec. Vzniká tak hotové teleso zároveň s vyrezaným podporným materiálom. Po každom cykle prejde plochou laminovací valec a tak utvrdzuje jednotlivé vrstvy telesa.

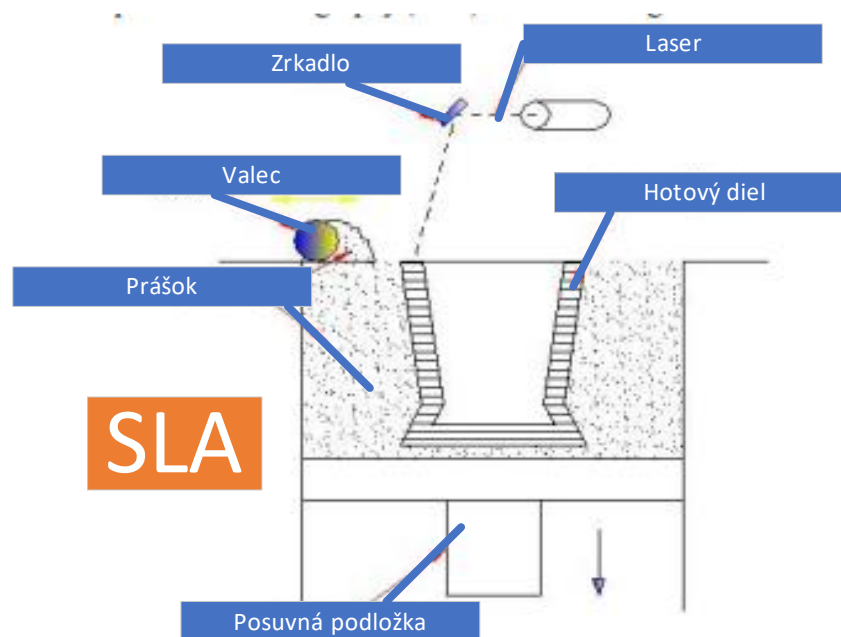
## 4 POROVNANIE VHODNOSTI 3D TLAČE

Technológia vie priniesť revolúciu pre spôsob výroby dielov v priemysle je z angličtiny „rapid prototyping“ zahŕňa pridávanie materiálu vrstvu po vrstve, pričom postupne vzniká 3D model a tým pádom vzniká z virtuálneho modelu reálny model. 3D tlačová technológia si našla uplatnenie vo výrobe, konštrukcii, medicíne, elektronike, obrane či potravinárskom priemysle. Rozličné metódy tlače ponúkajú rôzne výhody a nevýhody. V tejto práci a kapitole bude porovnaná metóda z angličtiny „Fused deposition modeling“ (FDM) a „Stereolithography“ (SLA) multikriteriálne a na základe porovnania sa vyberie vhodná metóda pre našu aplikáciu.

### 4.1 Charakteristika metód

#### 4.1.1 SLA

Je to prvá technológia 3D tlače objavená Charle Hullom vo firme 3D System inc. Na metódu sa využíva fotopolymerný materiál, ktorý je vytvrdzovaný UV laserom počas procesu tlače. Základný princíp je pod iniciáciou fotónov do všetkých molekúl a finálne do tekutej živice. Obr. 29)

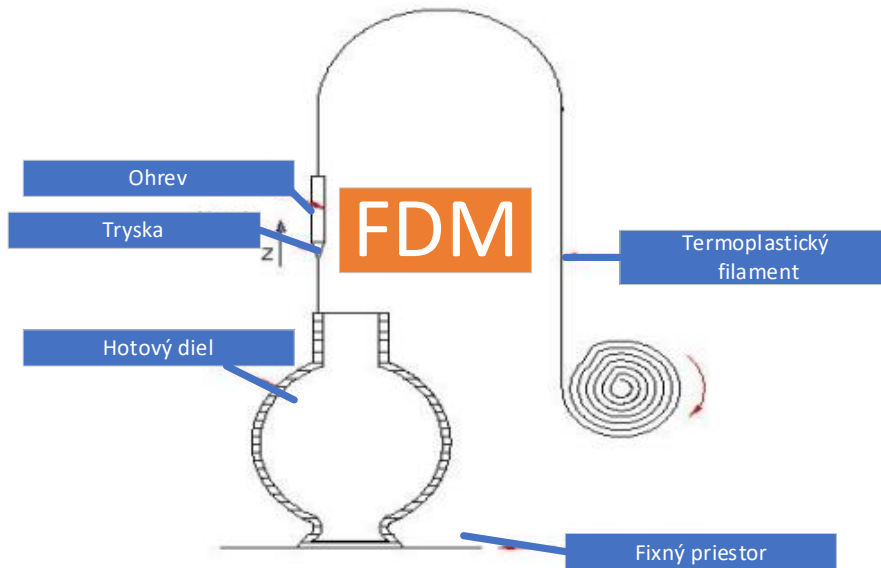


Obr. 29) Pracovný princíp SLA 3D tlače [24].

UV laser je kontrolovaný a vykoná želanú dráhu do živice tak, aby vznikla prvá vrstva. Po dokončení vrstvy je možné naniesť ďalšiu vrstvu a jej obraz. Po dokončení vrstvy sa posúva platforma smerom nadol. Celý princíp metódy je graficky znázornený na Obr. 29.

### 4.1.2 FDM

Metóda bola vyvinutá firmou Statasys Inc. Základným princípom metódy je výtlačný proces. Termoplastické materiály ako ABS (akrylonitrilbutadiénstyrén) alebo PLA (polyester) sú zdrojovým materiálom tlače. Tento filament prechádza najskôr cez chladnú časť extrúdera a potom nastáva ohrev v druhej teplej časti extrúdera. Na konci sa nachádza tryska s typickým priemerom 0,4 mm. Roztavený materiál tečie na podložku, ktorá býva tiež temperovaná na vyššiu podložku, tak, že v danej vrstve obkreslí materiál. Podložka sa hýbe potom v zápornom zmysle osy z nadol a vzniká nám tak model, často s podporami.



Obr. 30) Pracovný princíp FDM tlače [24].

## 4.2 Základné porovnanie metód

Charakteristika	FDM	SLA
Použité materiály	Termoplasty, termoplasty na nano vláknami, grafén, nylón	epoxy, akryláty
princíp tlače	extrúzia	Tisk, opláchnutie a UV vytvrdenie
Výhody metódy	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lacné prevedenie</li> <li>2. Vysoká rýchlosť tlače</li> <li>3. Veľké množstvo použitých materiálov</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vysoké rozlíšenie prvkov</li> <li>2. Bez problémové čistenie upchatej trysky</li> <li>3. Najviac používaný pre dentálne aplikácie</li> </ol>
Kapacita tlače [inch]	12x12x12	20x20x24
Nevýhody metódy	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Termoplastický materiál je jediný použiteľný.</li> <li>2. Strata homogenity v disperznom materiáli.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vysoké náklady</li> <li>2. Cytotoxicita zvyškových materiálov</li> </ol>
Využitie metódy	jednoduché koncepčné modely	funkčné prototypovanie, vzory

Tab 2) Porovnanie základných charakteristík tlače metód [24].

Charakteristika	FDM	SLA
Rozlíšení [max. 5]	2	5
Presnosť [max. 5]	4	5
Povrch [max. 5]	2	5
Priepustnosť [max. 5]	3	4
Komplexnosť dizajnu [max. 5]	3	3

Tab 3) Kvantitatívne zhodnotenie vlastností tlače v základných parametroch [25].

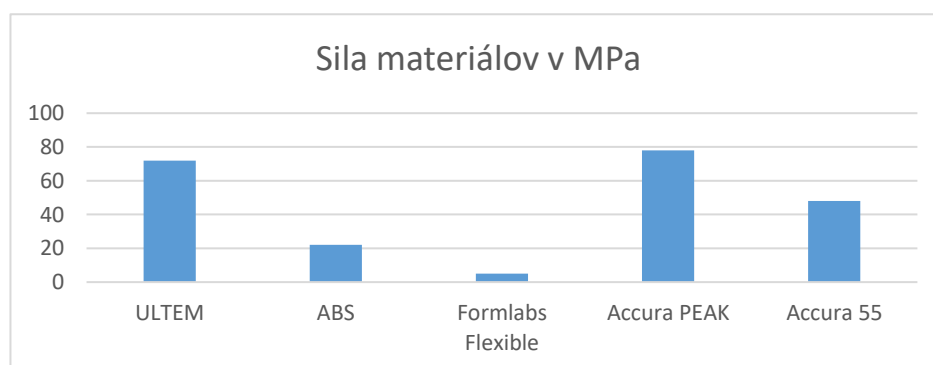
Porovnanie našich dvoch sledovaných metód je prevedené na Tab. 3 a 4. Obecné závery z porovnania sú: pre začínajúcich a ľudí, ktorí sa venujú vývoju nových dielov stačí prednostne FDM tlačiareň a pre ľudí, s nárokmi na presnosť a vyšším rozpočtom je tu pre nich SLA metóda. V Tab. 3 nájdeme kvantitatívne zhodnotenie niekoľkých základných vlastností.

Porovnanie metód		
	FDM	SLA
vrstvy [mm]	0.1 - 0.3	0.06-0.15
tvarové prvky [mm]	0.2	0.1
povrch	veľmi drsný	hladký
rýchlosť	pomalá	priemerná

Legenda typov rýchlosti	Legenda typov povrchu
rýchla	excelentný
priemerná	hladký
pomalá	drsný
	veľmi drsný

Tab 4) Kvantitatívne porovnanie metód [26].

Proces výroby dielov má určité kvantitatívne špecifiká. Stereolitografický typ 3D tlače je často využívaný ako medicínske aplikácie a v Tab. 4 sa dozvedáme, že typ povrchu je hladký a celá metóda dosahuje priemernej rýchlosti. V prípade FDM tlače je povrch aj rýchlosť rádovo horšie hodnotená.



Obr. 31) Grafické znázornenie sily materiálov pre FDM a SLA tlač.

Na grafickom znázornení na Obr. 31 môžeme vidieť ako jednotlivé materiály:

- **FDM:** ULTEM, ABS;
- **SLA:** Formlabs Flexible, Accura PEAK, Accura 55

### 4.3 Ekonomické porovnanie



Obr. 32) Porovnanie základných cien tlačiarň Prusa (zľava 3) a Fusion3 (zprava 1).

Ako môžeme vidieť na Obr. 32 pre vlastnenie tlačiarne typu SLA je nutné zabezpečiť 2 kusy strojov: 1) samotnú tlačiareň 2) vytvrdzovaciu a oplachovaciu komoru. Oproti nim je priemerná tlačiareň pre hobby aplikácie v jednom stroji. Pre materiály je štandardizované balenie 1kg v tekutom stave pre SLA tlač a pevnom tzv. „filament“ pre FDM tlač na Obr.32.



Obr. 33) Cenové porovnanie materiálu na 1 kg.



Z hľadiska prevádzky a cien energie:

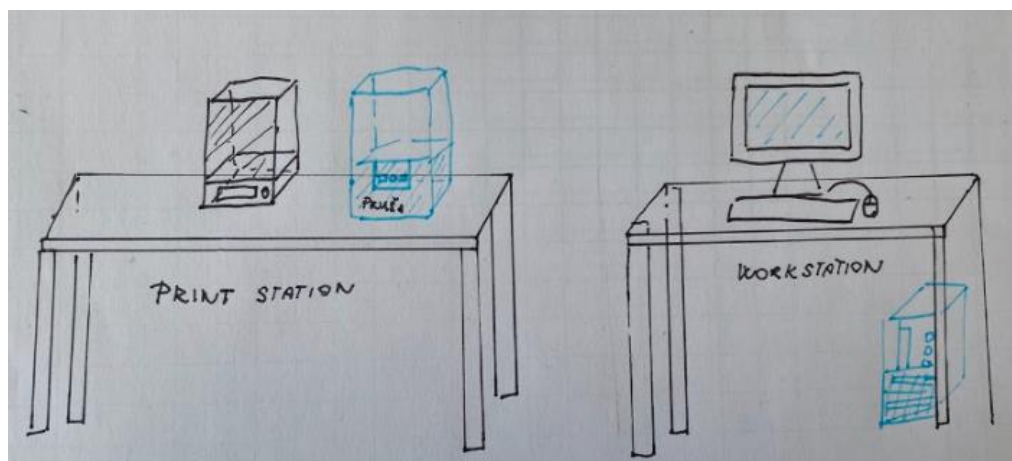
FDM: 25 CZK

SLA:  $2 \cdot 25 = 50$  CZK

Predpokladáme, že počas prevádzky sú zapnuté oba stroje SLA – tlačiareň a vytvrdzovacia komora. Z len tohto porovnania môžeme usúdiť, že prevádzka je o 100% drahšia.

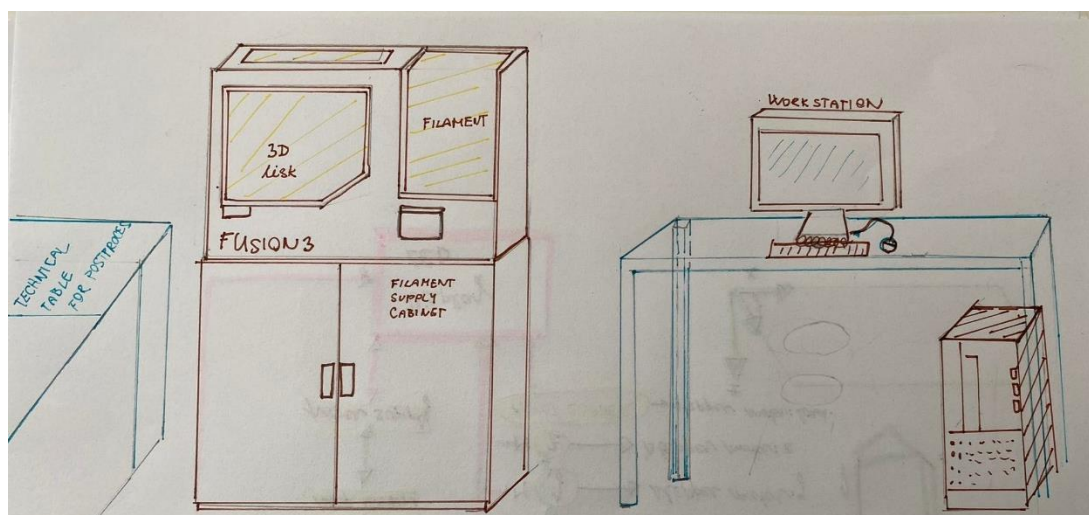
#### 4.4 Porovnanie usporiadania pracovnej bunky

SLA pracovné stredisko sa skladá z dvoch častí. Ovládací workstation PC prepojený cez SD kartu so súbormi na tlač. Vedľa tlačiarne je po ľavej strane vytvrdzovacia stanica. Oproti FDM na pracovnej bunke nemáme brúsnu post procesingovú stanicu.



Obr. 34) Pracovná stanica pre SLA tlačiareň

Tok činností pri FDM pracovisku je nasledovný: najprv sa navrhne a upraví 3D CAD model na Workstation. Následne sa to vyexportuje do G-kódu a pomocou LAN komunikácie sa kód zapíše do pamäte tlačiarne. Záverečným stanoviskom je stôl na obrusovanie, lakovanie a či farbenie výsledného prototypového dielu.



Obr. 35) Pracovná stanica pre FDM tlačiareň

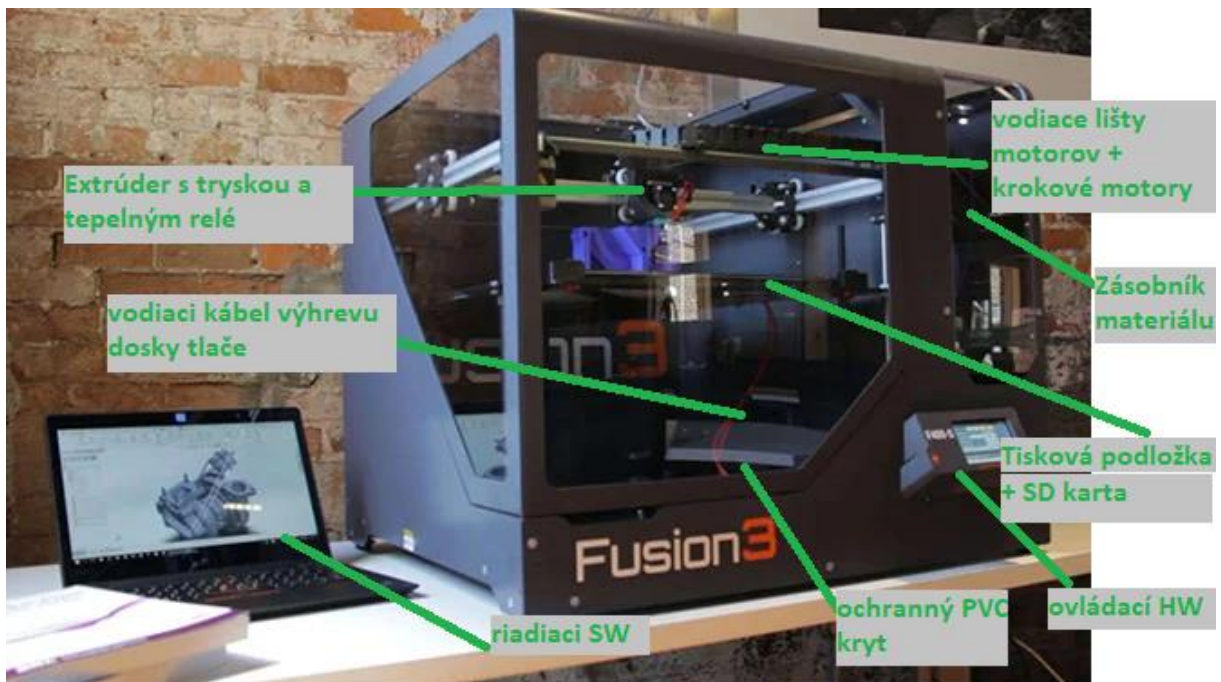
## 5 ANALÝZA RIZIK VYBRANEJ 3D TLAČIARNE

Na základe kapitoly 4. kde sme porovnali dva rôzne prístupy sme z hľadiska prevádzkových nákladov a skúsenosťami s tiskom obslužného personálu vybrali FDM 3D tlač. Potenciálny zákazník využíva tlačiareň Fusion3, ktorá bude použitá. Pred prácou je nutné zhodnotiť riziká súvisiace s tlačiarňou ako prevencia chýb a potenciálnych nebezpečí.

### 5.1 Technický popis tlačiarne

Stroj je rýchly profesionálny 3D FDM („Fused Deposition Modeling“) prístroj určený na 3D tlač aj väčších formátov, viz. Popis technických parametrov stroja. Tlač z materiálu prebieha nasledovne: zásobník skladuje materiál v separátnej časti stroja ako „bužírku“ v tuhom stave navlečenej do kruhu. Štandardný priemer tohto pásu je 1,75 mm a ďalej pomocou krokového motora a podávača sa posúva k hlave extrúderu.

Tu sa hlava zohrieva na teploty okolo 200°C podľa typu taveného materiálu. Následne sa tekutý plast nanáša na dosku, ktorej výsledný max. objem zaberá 355 x 355 x 315mm. Tlačová doska je zo skla a zahrieva sa na požadovanú teplotu okolo 60°C. Je to pridaný bonus výrobcu v snahe eliminovať nežiadúce chyby vyplývajúcej z povahy plastov a ich chemickým vlastnostiam a adhézií jednotlivých vrstiev [27].



Obr. 36) Náhľad na 3D tlačiareň s popisom dielov [27].

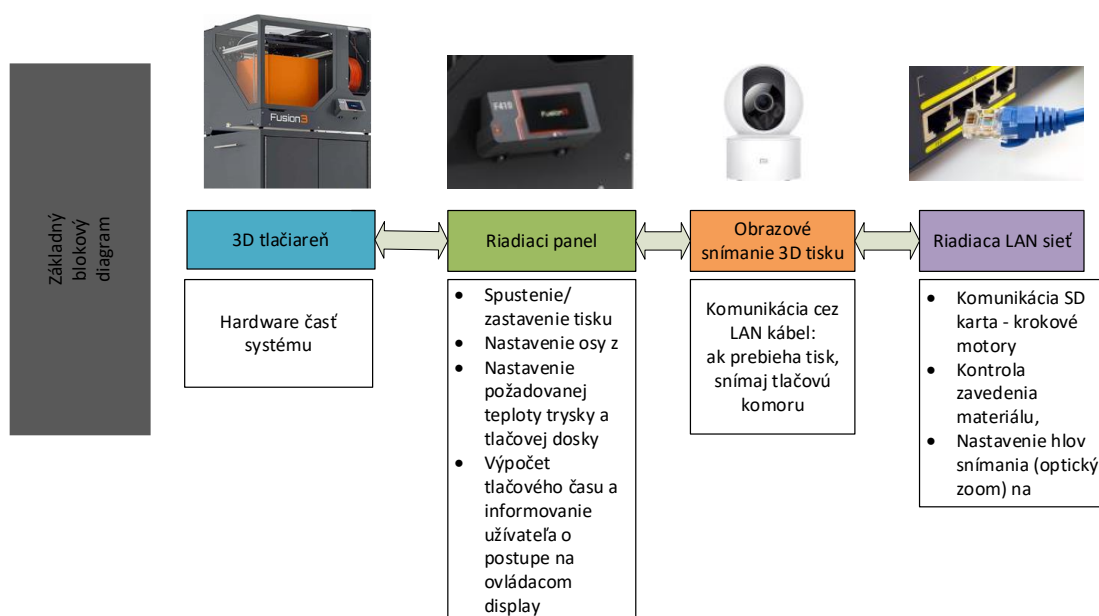
Presnosť stroja sa uvádza do 0,003 mm, záleží to ale na použití typu materiálu. Tlač prebieha v osiach xy = základná doska, hlava vždy z načítaného G-kódy vyberie súradnice, kde je nutné naniesť plochu plastu a posúva sa krokovými motormi ďalej. Po ukončení práce vo vrstva sa klesá celý extrúder väčšie a opäť začne tlačiť. Tento proces sa opakuje kým nedosiahneme z = výška modelu. Tento model obsahuje aj ochranný plastový kryt, ktorý je počas tlače vo



východnej polohe a ochraňuje tak pracovníka a zároveň zachováva konštantnú teplotu pri tlači viz. Obr. 36 a tabuľka 5.

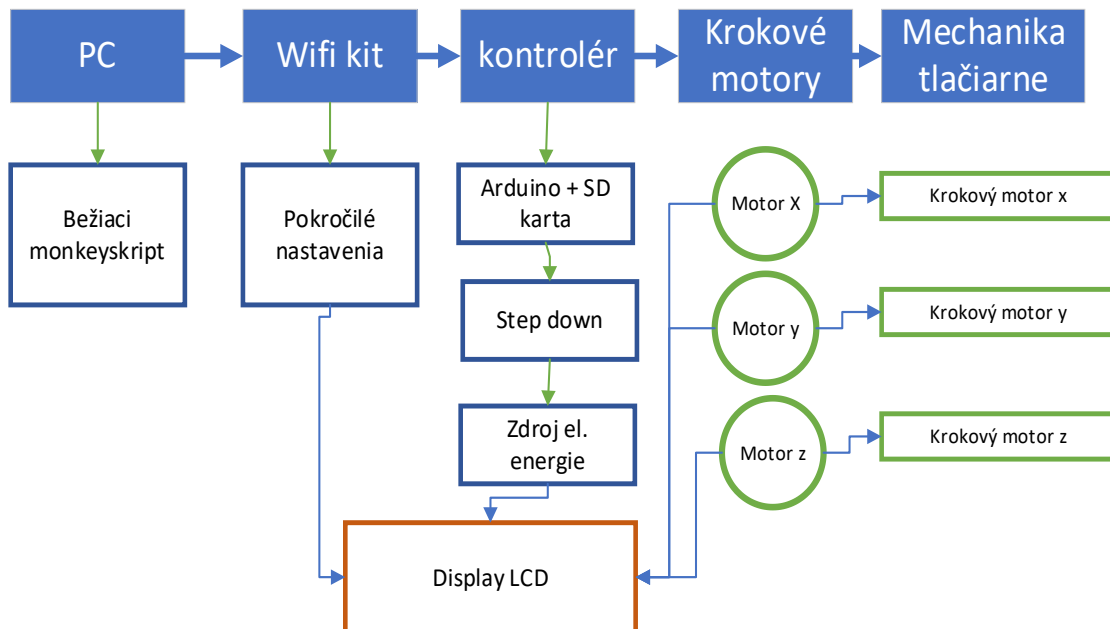
<b>Fyzické rozmery a váha</b>	
Rozmery(DxŠxV)	724 x775x648 mm
Váha	38,56 kg
<b>3D Tisk</b>	
Max tlačový objem	335*355*315
Technológia 3D TIDSKU	FFF (Fused filament Fabrication)
Rýchlosť tlače	250mm/s
Max pohybová rýchlosť	500 mm/s
Extrúder	typ bowden
<b>Teploty</b>	
okolitá teplota prostredia	7.29
teplota povrchu	multizónové ohrievanie
max teplota povrchu	140
<b>Cena</b>	
3D tlačiareň	\$4,999
skrinka pod tlačiareň	\$649
tlačová hlavica	\$160
<b>Software</b>	
Procesový systém	Fusion3 REACTOR
Operačný systém	Windows, (Windows, Mac, Linux)
Podporované súbory	.STL, .OBJ

Tab 5) Sumarizácia technických parametrov tlačiarne [27].



Obr. 37) Základný blokový diagram

Na detailnom blokovom diagrame vidíme funkčné bloky sústavy a ich vzájomné prepojenie na LCD display, ktorý slúži ako riadiaca jednotka celej prevádzky. Priame dáta o polohe sú spätne vyvedené na display znázornené na schéme Obr. 38.



Obr. 38) Detailný blokový diagram tlačiarne [27].

## 5.2 Identifikácia relevantného nebezpečenstva

Podľa českej technickej normy ČSN EN ISO 12100 s názvom Bezpečnosť strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukcií - Posúdenie rizika a znižovanie rizika delíme riziká do 10 kategórií:

1. mechanické nebezpečenstvo
2. elektrické nebezpečenstvo
3. tepelné nebezpečenstvo
4. nebezpečenstvo hluku
5. nebezpečenstvo vibrácií
6. nebezpečenstvo žiarenia
7. nebezpečenstvo materiálov/látok
8. ergonomické nebezpečenstvo
9. nebezpečenstvo spojené s prostredím, v ktorom je stroj používaný
10. kombinácia nebezpečenstva [28].

Pre túto prácu boli vybraté jednotlivé komponenty systému a ich lokalizácia na tlačiarňu a k nim boli doplnené jednotlivé riziká. Výsledky práce sú súčasťou Prílohy č.1.

### 5.3 Zoznam významných nebezpečenstiev

Na základe grafu pre odhad rizika sme určili jednotlivé vplyvy a jednotlivé výsledky sú v prílohe č.2 záverečnej práce.

#### Zoznam rizík a ich delenie:

##### **S – závažnosť škody,**

- S0 – žiadne nebezpečenstvo
- S1 – ľahké poškodenie
- S2 – ťažké poškodenie
- S3 – smrť

##### **A – vystavenie osôb**

##### **nebezpečenstvu,**

- A1 – zriedka až častejšie
- A2 – často až trvalo

##### **E – možnosť vyvarovanie sa**

##### **škody,**

- E1 – možné

- E2 – možné za určitých okolností
- E3 – sotva možné

##### **W – pravdepodobnosť výskytu**

##### **škody,**

- W1 – malá alebo nepravdepodobná
- W2 – stredná
- W3 – veľká.

##### **Hodnota rizika**

- 0-4 je prijateľné riziko,
- 5-6 je riziko prijateľné po overení,
- 7-18 je neprijateľné riziko.

### 5.4 Analýza významných nebezpečenstiev

Boli určené významné nebezpečia a ich popis vo všetkých fázach životného cyklu:

- doprava,
- montáž, inštalácia a uvedenie do prevádzky,
- prevádzku stroja,
- čistenie a údržbu stroja,
- vyhľadávanie porúch a ich odstránenie,
- vyradenie z prevádzky, demontáž
- vyhodnotenie projektu a chýb

Výsledky analýzy je možné nájsť v Prílohe č.3.

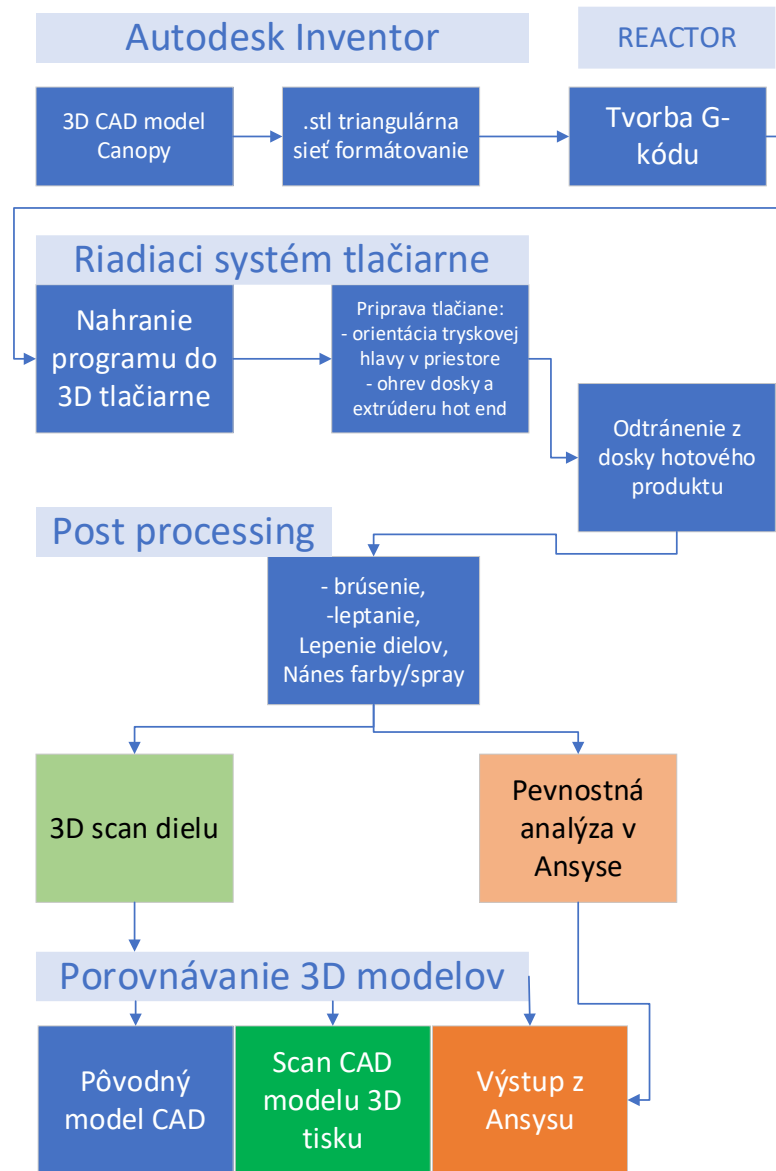
### 5.5 Znižovanie rizík

Pre zabezpečenie bezpečnosti pri práci bol vypracovaný formulár pre odhad rizika na zníženie a vybavenie opatrení, ktoré pomôžu bezpečnosti práce. Výsledky sú opäť spracované v prílohách práce ako Príloha č.4.

## 6 OPTIMALIZÁCIA 3D TLAČE

### 6.1 Popis postupu optimalizácie

Zadaná úloha by sa dala rozdeliť do šesť kľúčových oblastí a ich prepojenie tvorí celý postup ako je uvedené na Obr. 39.



Obr. 39) Náčrt riešenia zadanej úlohy.

Jednotlivé oblasti sú:

- **CAD + CAM príprava:** pripravujeme jednotlivé modely, exportujeme do triangulačnej siete .stl a následne do aplikácie Reaktor, z ktorej nám generuje G – kód= finálny model pre tlačiareň
- **Technológia 3D tlače:** využívame tlačiareň Fusion3 ako FDM metódu 3D tlače
- **Technológia povrchových úprav:** jedná sa o dve väčšie skupiny. Prvá je chemická úprava povrchu: acetómom alebo modelárskymi farebnými spraymi. Druhá je mechanická úprava brúsením a rezaním nadbytočných plôch a odstránenie supportov.

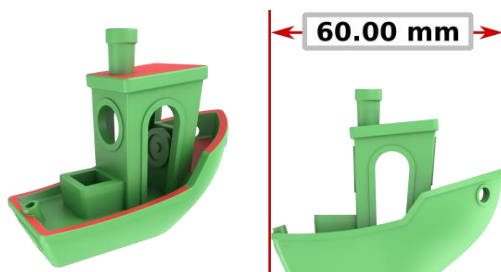
- **Technológia 3D scannovania:** Pre porovnanie presnosti výsledného dielu s modelom je nutné zhotoviť jeho „virtuálnu dvojčku“ a porovnať rozdiely
- **MKP analýza:** pevnostná analýza slúži na porovnanie teorému o kolaps stien a porovnanie namáhania s pôvodným modelom ako nástroj topologickej optimalizácie
- **Porovnanie výstupov:** po zoskenovaní je to špeciálna aplikácia Gom Inspect, ktorá importuje východzí a výsledný model a ich rozmerovo porovná a vyhodnotí kde sa diely rozlišujú.



Obr. 40) Kľúčové oblasti praktickej časti diplomovej práce.

## 6.2 Testovací projekt Benchy

Na začiatku práce s 3D Tlačiarňou Fusion3 sme zhotovili kalibračné merania rôznych materiálov na prototype so známymi rozmermi ako projekt Benchy. Modelovým prototypom je lodička o objeme  $15,53 \text{ cm}^3$ . Ponúka viaceré modelové situácie a náročne vizuálne tak, že je možné otestovať kvalitu tlače [29].



Obr. 41) Lodička Benchy – modelový prototyp [29].

Pre naše kalibračné meranie sme zvolili 5 prototypov lodičky z rôznych materiálov a formátov: Chybná tlač PETG, zväčšená tlač 1,2x PETG, normálny PETG, normálny PLA a normálny ABS.

Znáznornené na Obr. č.42. Jedna z vlastností pri 3D tisku je zmršťovanie rozmerov a jednotlivých vrstiev filamentu. Tie boli v kalibračnom teste ako vstupy menšie ako 100% zhoda z teóriou. V prípade, že sa jednalo o chybný tlač a rozmer nebol zmerateľný, potom figurovala hodnota 0 a odrazilo sa to na celkovom priemere.



Obr. 42) Kalibračné meranie jednotlivé materiály prototypov.

Kalibračné meranie					
meraný rozmer/ materiál	PETG1 - chybný diel	PETG2	PETG3 - scale 1,2x	PLA	ABS
dĺžka strechy	100,83	100,00	125,13	103,13	99,13
oblasť komína a rozmary	124,29	0,00	0,00	0,00	0,00
		99,00	129,43	98,86	100,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
horizontálna celková dĺžka	101,85	108,98	133,33	100,38	100,00
horizontálna celková šírka	115,48	98,90	128,48	110,32	101,29
vertikálna celková výška	99,38	110,42	146,23	100,75	100,00
	100,39	99,35	125,81	100,65	98,71
krabica na palube rozmary	97,71	99,43	114,29	105,00	101,43
	93,75	100,50	145,00	94,25	104,13
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	101,33	99,00	129,17	97,83	98,50
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
kruhové okno rozmary	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	93,75	103,75	95,50	88,75
predné okno rozmary	0,00	95,24	126,67	101,05	100,00
	0,00	100,42	128,42	99,68	100,00
cylindrické okno rozmary	0,00	101,67	90,17	100,58	96,92
	0,00	100,00	180,00	100,00	101,44
uhol naklonenia dna	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
naklonenie strechy	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
popisok písmená	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab 6) Percentuálne porovnanie voči teoretickým rozmerom v %.

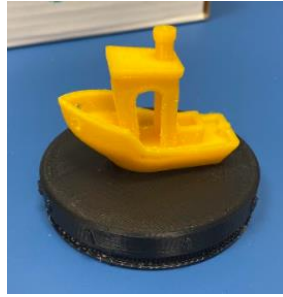
Tvrde dáta boli získané opakovaným meraním digitálnymi posuvným meradlom a výsledok bol sprimerovaný. Následne bolo určené rozdiel proti teoretickému modelu a výsledok bol vyjadrený v %. Obecne vzhľadom na technologickú povahu 3D tlači, kde sa nám materiál deformuje po vrstvách a hrany sa nadvihujú. Preto považujeme hodnoty pod 100% zhody ako rizikové voči deformovaniu povrchu.

Ďalej boli vyhodnotené výsledky nad 100% dosiahli 9x materiály ABS a PLA, materiál PETG 6x. ďalej boli odstránené z merania tie, kde sme nevedeli presne zmerať rozmer v Tab. 7. Kalkulácia a priemerný % pomer sú tak nezaťažené chybou merania.

Kalibračné meranie: záverečné porovnanie					
Meraný rozmer/materiál	PETG1 - learning by doing [%]	PETG2 [%]	PETG3 - scale 1,2x [%]	PLA [%]	ABS [%]
dĺžka strechy	100,83	100,00	104,28	103,13	99,13
oblasť komína a rozmery	124,29	99,00	0,00	98,86	100,00
horizontálna celková dĺžka	101,85	108,98	107,86	100,38	100,00
horizontálna celková šírka	115,48	98,90	0,00	110,32	101,29
vertikálna celková výška	99,38	110,42	111,11	100,75	100,00
	100,39	99,35	107,07	100,65	98,71
krabica na palube rozmery	97,71	99,43	121,86	105,00	101,43
	93,75	100,50	104,84	94,25	104,13
	101,33	99,00	95,24	97,83	98,50
	0,00	93,75	120,83	95,50	88,75
rozmery predného okna	0,00	95,24	0,00	101,05	100,00
	0,00	100,42	107,64	99,68	100,00
cylindrické okno rozmery	0,00	101,67	0,00	100,58	96,92
	0,00	100,00	0,00	100,00	101,44
<b>Priemer</b>	<b>66,79</b>	<b>100,48</b>	<b>70,05</b>	<b>100,57</b>	<b>99,31</b>

Tab 7) Záverečné zhodnotenie rozmerovej skúšky

Zo záverečného zhodnotenia rozmerovej skúšky je možné usúdiť, že použitie všetkých materiálov vykazuje podobnú mieru presnosti, či už v priemere porovnaní alebo zhodnotením podielom vzorovej komponenty ku meranej prenasobenej 100 na percentuálnu hodnotu. Okrem kalibračného merania boli lodičky preskúvané aj vizuálne ako celkovo prvok. Z tohto porovnania jednoznačne vynikla loď z ABS. Jej charakter je celistvý, s dôrazom na detail a zároveň bolo ľahko odstrániteľný podporný materiál.



Obr. 43) Najpresnejšia lodička- materiál ABS

### 6.3 Výber komponenty na 3D tlač

Pre výber komponenty sme použili multikriteriálny výber tak, že sme si zvolili na začiatku výberu hľadiská a charakteristické črty dielu:

- **Komplexnosť dielu:** musí sa jednať o priestorovo tvarovaný diel s funkčnými zaobleniami, dierami či tvarovými výbežkami.
- **Rozmery dielu:** musí sa nachádzať v intervale od 5x3x3 cm do 15x10x10 cm
- **Využitelnosť:** diel musí patriť medzi diely s vysokým množstvom opráv
- **Produktový cyklus:** diel musí byť v prvých častiach životného cyklu s dlhším časom do konca opráv najmenej 1,5 roka
- **Celistvosť dielu:** diel musí byť konečným rozobratelným elementom bez elektrických alebo elektromechanických prvkov







Obr. 44) (hore) Rôzne typy materiálu vybraného dielu, (dole) zložený diel do zostavy



Obr. 45) Vizuálne zobrazenie dielu v rámci celej zostavy dielov scanneru [30].

## 6.4 Legislatíva 3D tlače

Podľa úradného vestníka Európskej únie existuje dokument P8\_TA(2018)0274 Trojrozmerná tlač: práva duševného vlastníctva a občianskoprávna zodpovednosť ako Uznesenie Európskeho parlamentu z 3. júla 2018 o trojrozmernej tlači ako výzve v oblasti práv duševného vlastníctva a občianskoprávnej zodpovednosti (2017/2007(INI)). Tento dokument hovorí odkazuje na:

- smernicu Európskeho parlamentu a rady 2004/48/ES z 29. apríla 2004 o vymožitelnosti práv duševného vlastníctva,
- smernicu Rady 85/374/EHS z 25. júla 1985 o aproximácii zákonov,
- stanovisko Európskeho hospodárskeho a sociálneho výboru na tému Život zajtrajška. Tlač 3D – nástroj na posilnenie európskeho hospodárstva,
- oznámenie Komisie z 29. novembra 2017 s názvom Vyvážený systém presadzovania práv duševného vlastníctva, ktorý reaguje na problémy súčasnej spoločnosti (COM(2017)0707) [31].

Výber z obsahu legislatívneho vestníka:

- tlač sa sprístupnila širokej verejnosti, keď sa na trh zaviedli 3D tlačiarne pre súkromné osoby a keď na trh vstúpili podniky, ktoré ponúkajú digitálne modely aj služby 3D tlače

- 3D tlačiarňami je sektorom, ktorý sa vyznačuje rýchlym rastom, a očakáva sa, že tento trend bude pokračovať aj v ďalších rokoch
- 3D tlač má obrovský potenciál zmeniť dodávateľské reťazce vo výrobe, čo by Európe mohlo pomôcť zvýšiť úroveň produkcie; keďže uplatňovanie tejto technológie ponúka nové príležitosti pre rozvoj podnikania a inovácie;
- 3D tlač prináša inovatívnym podnikom mnoho potenciálnych výhod; keďže 3D tlač umožňuje predovšetkým znížiť celkové náklady pri vývoji, navrhovaní a testovaní nových výrobkov alebo pri zlepšovaní existujúcich výrobkov;
- nedostatočná regulácia obmedzuje používanie 3D tlače v kľúčových priemyselných odvetviach, akými sú napríklad letectvo a zdravotníctvo/zubárstvo, a keďže regulovanie používania 3D tlačiarňí pomôže zvýšiť využívanie technológií a vytvorí príležitosti na výskum a vývoj;
- trojrozmerná tlač v dôsledku postupov, ktoré využíva, spôsobuje to, čo sa v tomto odvetví opisuje ako určitá „fragmentácia tvorivého aktu“, keďže dielo môže cirkulovať v digitálnej forme predtým, ako nadobudne fyzickú podobu, čo uľahčuje jeho kopírovanie a komplikuje boj proti falšovaniu [31].

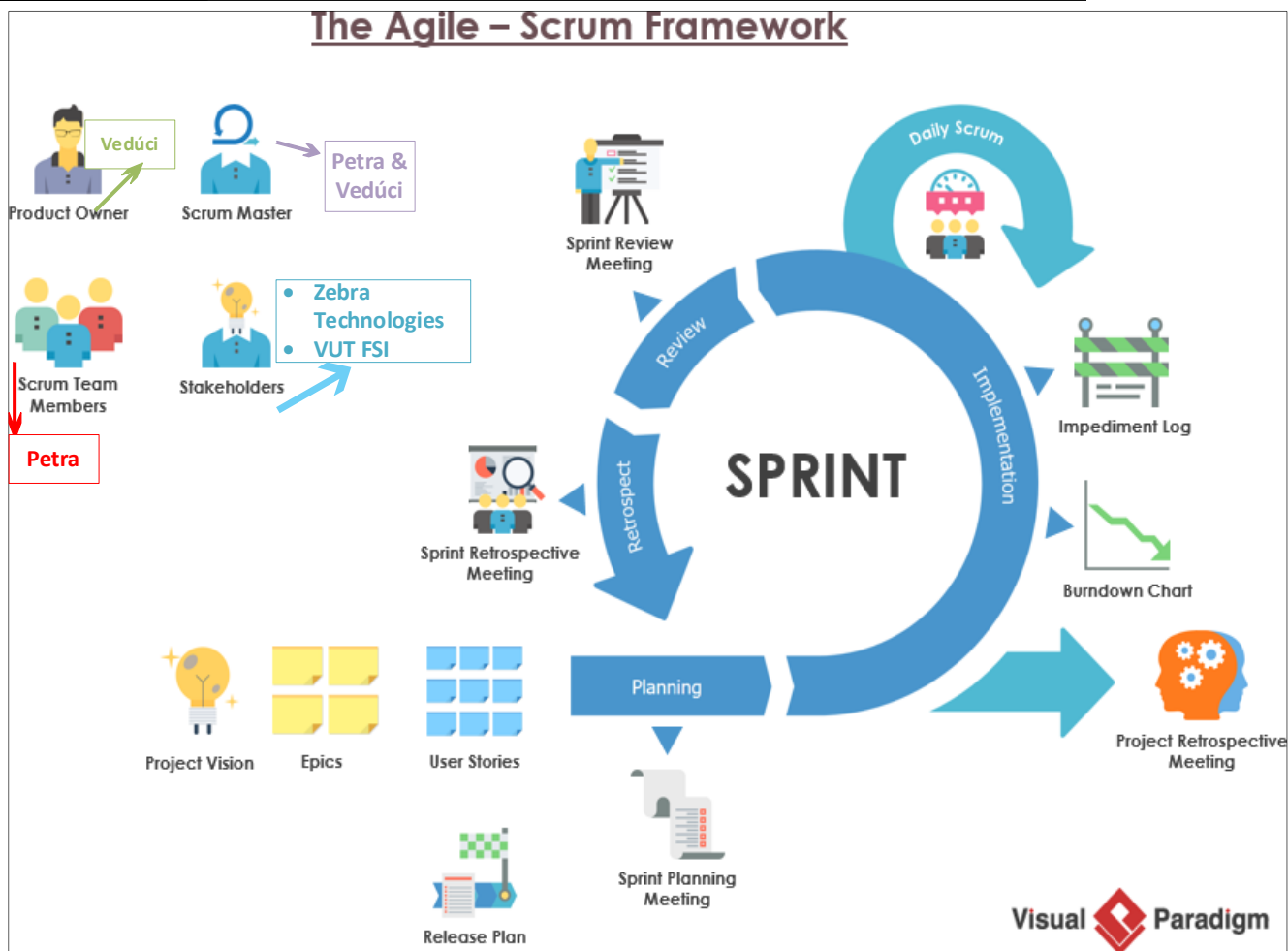
## 6.5 Agilný vývoj praktickej časti práce

Práca bola vypracovávaná agilným spôsobom a využitím metodológie SCRUM. Jeho agilita sa opiera za základných 12 princípov:

- Uspokojiť zákazníka,
- vítať meniace sa požiadavky zákazníka,
- časté doručenie fungujúceho riešenia,
- obchodné oddelenie spolupracuje s vývojom denne,
- projekty sú postavené na motivovaných jednotlivcoch,
- osobné stretnutia sú najlepšie pre vývoj,
- záleží na funkčnom software,
- konštantný vývoj,
- vysokokvalitný kód je rýchlejší,
- maximalizovať prácu, ktorá nie je hotová,
- samostatne fungujúce tímy doručia kvalitu,
- pre zlepšenie sú zavedené stretnutia na spätnú väzbu [32].

Ďalej sú zavedené 4 piliere hodnôt:

- Cenený sú individuálni a interakcie cez procesy a nástroje.
- Fungujúci software nad zrozumiteľnou dokumentáciou.
- Spolupráca so zákazníkom cez dojednávanie zmlúv.
- Odpovedanie na zmenu cez plnenie fixného plánu [32].



Obr. 46) Rozdelenie rolí a náčrt cyklu SCUM [33].

Na Obr. 46 môžeme vidieť principiálne rozdelenie jednotlivých etáp v agile projekt managemente. Najskôr je nutné si ujasniť role, pre ktoré je špecifikované správanie:

- Product owner: vedúci práce;
- SCRUM master: Petra + Vedúci;
- Scrum team: Petra;
- Stakeholders: VUT, Zebra Technologies.

Najdôležitejšia je projektová vízia, ktorá reflektuje požiadavky všetkých zainteresovaných strán.

# Projektová vízia

## Čo?

Vytvoriť dizajnovú modifikáciu použitím strojového učenia a vstupov Ansysu aby sme optimalizovali dizajn rýchlosť produkcie a optimalizácia nákladov použitím 3D tlače

## Pre koho?

- **Zebra Technologies:** Využitie držiakov scanorv ako využitie 3D priemyselných tlačiarí
- **Vedúci práce:** dosiahnuť riešenia na zadanú problematiku v popise diplomovej práce.
- **Fakulta:** úspešne obhájenie práce a dosiahnutie výsledkov a odpovedí v popise diplomovej práce.

## Súčasná riešenia:

Pozornosť je skôr pre CFD riešenia ako simulácia napätia a toto by mohlo pomôcť expandovať použitie MKP a automatizovaný dátový prístup.

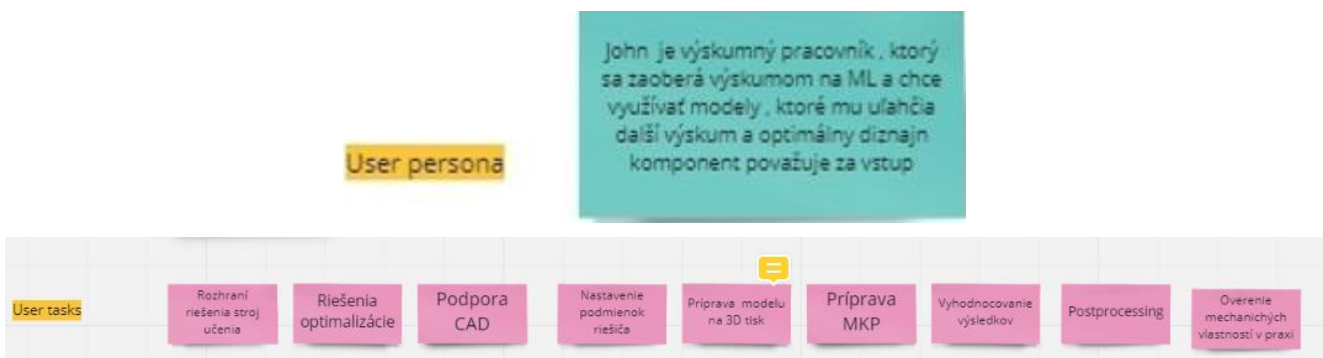
Obr. 47) Projektová vízia diplomovej práce.

Projektovú víziu môžeme vidieť na Obr.47, kde je definované čo – pre koho a súčasne riešenia problematiky. Na Obr. 48 môžeme vidieť formulovanie cieľov tzv. „epics“ pre jednotlivé šprinty. Šprintom nazývame ucelenú časť projektu, kde je definovaný 1 cieľ, ktorého sa snažíme dosiahnuť.

<p><b>0. Sprint Definícia zadania:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• formovanie riešeného problému a zapojenie potrieb oboch stakeholders</li> <li>• návrh cieľov</li> <li>• formulácia zadania</li> <li>• vypísanie v systéme StudIS</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>10.8 – 26.9.</b></p>	<p><b>0.1 Sprint Intro Rešerš</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prečítanie doporučeného článku             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Úvodná rešerše</li> </ul> </li> <li>• Doplnenie technického backgoundu z článku             <ul style="list-style-type: none"> <li>• KNIME instal a kurz</li> </ul> </li> <li>• Výber priemyselovej komponenty</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>27.9. – 11.10.</b></p>	<p><b>1. Sprint: define Zebra bottlenecks with the technology and use SW solutions available</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Define zebra bottlenecks</li> <li>• Find open source solutions</li> <li>• 3D print the first CAD models             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compare material use</li> <li>• Compare technology</li> </ul> </li> <li>• Architect the possible automation options for this issue</li> </ul> <p style="text-align: right;"><b>From: 28.10. To: 25.11.</b></p>
--	---	---

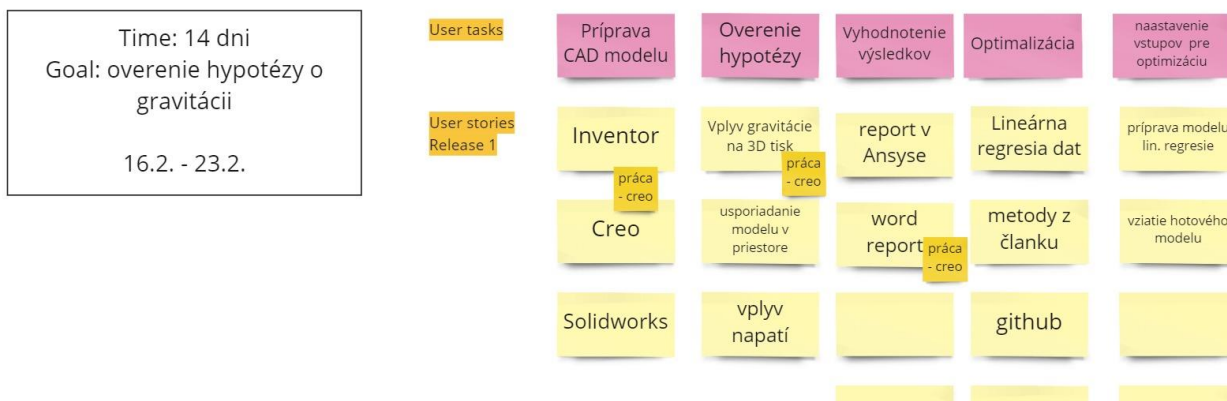
Obr. 48) Ukážka formulovanie cieľov jednotlivých šprintov

Ďalším elementom sú jednotlivé príbehy užívateľov nášho riešenia, kde si predstavujeme situáciu s dokončeným produktom/softwarem a mapujeme jednotlivé úlohy, ktoré má pri využívaní softwaru tzv. „user tasks“.



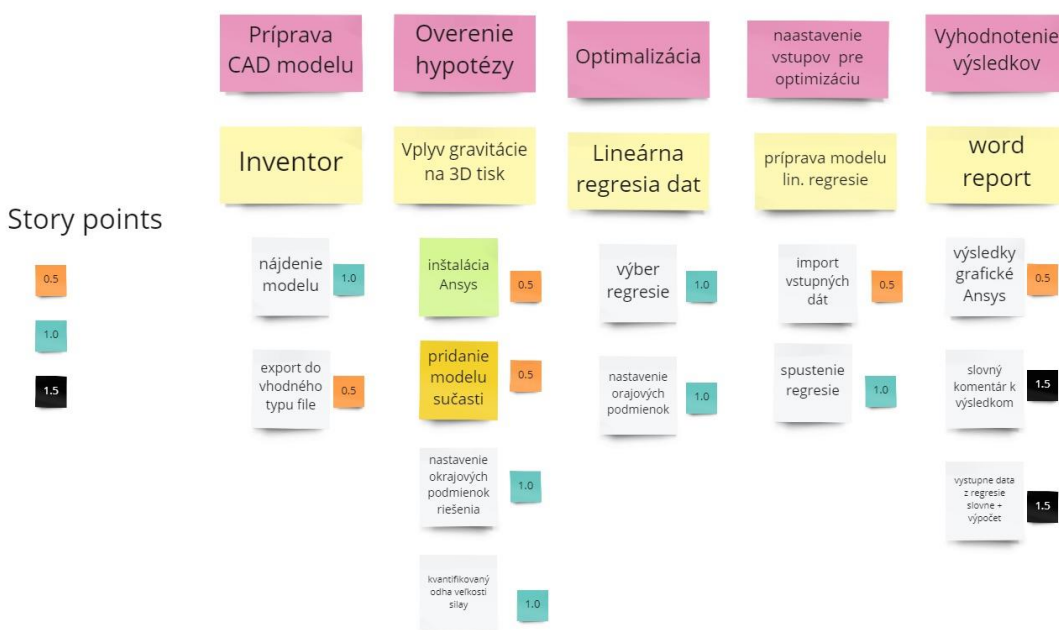
Obr. 49) Ukážka formulácie osoby a jej užívateľských krokov.

Pre každý šprint je zvolené časové obdobie v ktorom sa venujem vybranej problematike. Prvým krokom je zvolenie z angličtiny „user tasks“ úlohy užívateľa a ktoré robí pri využívaní technológie s ohľadom na vytýčený cieľ. Riešenie jednotlivých úloh je vždy v stĺpci pod úlohou a vymenúva nástroje alebo možnosti, ktoré môžu byť použité pre dosiahnutie úlohy pod anglickým názvom „user stories“ v preklade príbehy užívateľa. Oba pojmy dokopy spolu tvoria tzv. „ product backlog“ databázu projektu.



Obr. 50) Príklad Product Backlogu

Po zostavení product Backlogu je nutné vybrať cestu, ktorou sa pri riešení budeme zaoberať a voľbu zdôvodniť. Napríklad použitie určitého SW z dôvodu, že s ním máme skúsenosti a máme k dispozícii licenciu oproti inému, kde by práca vyžadovala ďalšie náklady na kúpu licencie. Následne zostavíme poradie z vybraných „user stories“ a každému okruhu úloh priradíme konkrétne elementárne kroky, ktoré budeme musieť robiť. Zložitosť označíme bodovým hodnotením od 0,5 pre najľahšie po 1,5 ako je na Obr. 51.



Obr. 51) Ukážka realizácie plánu na 1 šprint s bodovým hodnotením úloh.

## 6.6 Chyby pri 3D tlači

Pri využívaní 3D tlače ako metódy výroby rýchlych prototypov vznikajú pri tlači rôzne chyby. Tieto chyby možno kategorizovať do podskupín:

- Chyby tlačiarne,
- chyby modelu,
- chyby softwaru.

**Medzi chyby tlačiarne môžeme zaradiť:**

- Chyby zavedenia filamentu,
- chyba upchania trysky,
- chyba nanesenia lepidla na dosku,
- chyba výhrevu trysky,
- chyba výhrevu tlačovej hlavy,
- chyba dodávky elektrickej energie.

Pri chybe zavedenia filamentu sa môže stať, že sa filament v extrúderi zlomí na niekoľko častí a tým spôsobí nepoužiteľnosť tlače a materiál treba znova zasunúť. V prípade, že túto chybu neodstránime, tlačiareň prejde do pracovného režimu a celý model tlačí bez materiálu, t.j. iba prechádza cez trajektóriu bez tlače materiálu.

Druhou chybou môžeme objaviť pri dlhodobom používaní 3D tlačiarne, kedy sa nám roztavený materiál nanesie na trysku a vytvorí tam súvislú vrstvu cez ktorú materiál už neprejde materiál a tryska sa upcháva.

Pri manipulácii je nutné vyčistiť dosku, odstrániť prebytočný materiál a lepidlo na doske. Toto je treba znovu natrieť tesne pred tlačou.

Tryska aj podložka sú ohrievané na určitú teplotu podľa druhu materiálu. Je možné, že sa zamení materiál a ohreje nám dosku na nesprávnu teplotu, čo môže spôsobiť, že materiál nebude v optimálnom stave na tlač. Nesprávnym ohrevom dosky môže vzniknúť chyba, že výsledný model sa prílepí k doske a bude veľmi problematické ho odstrániť bez poruchy povrchu.

Hlavný zdroj je elektrická energia. Môže nastať porucha prívodu a tlačiareň nespustí prevádzku.



Obr. 52) Chyby pri tlači – chyby modelu.



## Chyby modelu:

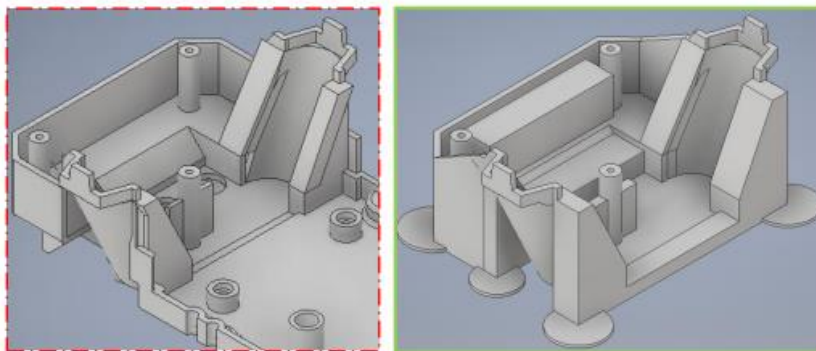
- chybný export modelu
- technologicky neupravený diel
- nesprávne použitie podpor
- adhézia vrstiev



Obr. 53) Chyba dokončenia vrstiev v 3. a 4. diele.

Modely ktoré podporuje software REACTOR sú: .stl, .ply., .obj, .off ak vyexportujeme z CAD softwaru model len z obrysových čiar, nebude nám fungovať dobre tlač a aplikácia nevie rozoznať poriadne model, takže ho môže pochopiť aj inak. Rovnako zlyhá aj pri exporte do iných než podporovaných súborov.

Technológia 3D tlače vyžaduje aj myslenie v oblasti reverzného inžinierstva. Pre 3D tlač materiálom ABS je nutné kvôli adhézii vrstiev pridať technologický prídavok materiálu na spodnú vrstvu ako je na Obr. 54.



Obr. 54) Technologická optimalizácia dielu pre ABS 3D tlač [34].

## 6.7 3D skenovanie dielov

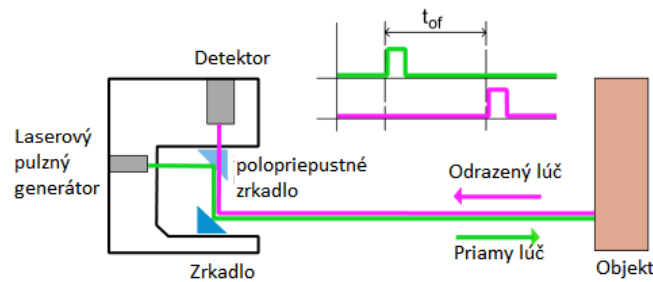
Na trhu existuje v súčasnosti veľa variant ako zahájiť proces 3D skenovania. Základné rozdelenie je nasledujúce:

- Ručné skenovanie
- Fixné strojové skenovanie

V prvom prípade má pracujúci 3D skener s ručným úchopom a diel skenuje postupne. Jeho úlohou je nasnímať súčasť z každej strany tak, aby nestratil dáta. Toto skenovanie nie je vhodné na malé súčiastky a skôr sa jedná o približné zobrazenie dielu. Technologicky sa využíva laserové svetlo.

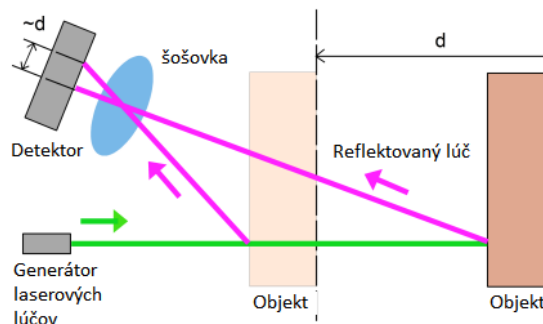
### 6.7.1 Metódy 3D skenovania

Na trhu existujú rôzne technologické metódy s optikou. Prvá z nich je založená na jednoduchšej metóde času letu. Vnútri skeneru je generátor, ktorý generuje malé pulzy laseru. Tieto pulzy letia cez priestor až na skenovaný objekt a tam sa odrazia a letia naspäť. Rozdiel medzi generovaným pulzom je proporcionálny k vzdialenosti objektu. Výhodou metódy je možnosť skenovania na dlhšie vzdialenosti a snímanie veľkých objektov ako sú budovy. Nevýhodou metódy je jej presnosť, komplikuje sa to z dôvodu rýchlosti svetla a času merania, ktorý je komplikovaný s presnosťou vzdialenosti merania, kde presnosť je v rádoch milimetrov [35].



Obr. 55) Metóda času letu [35].

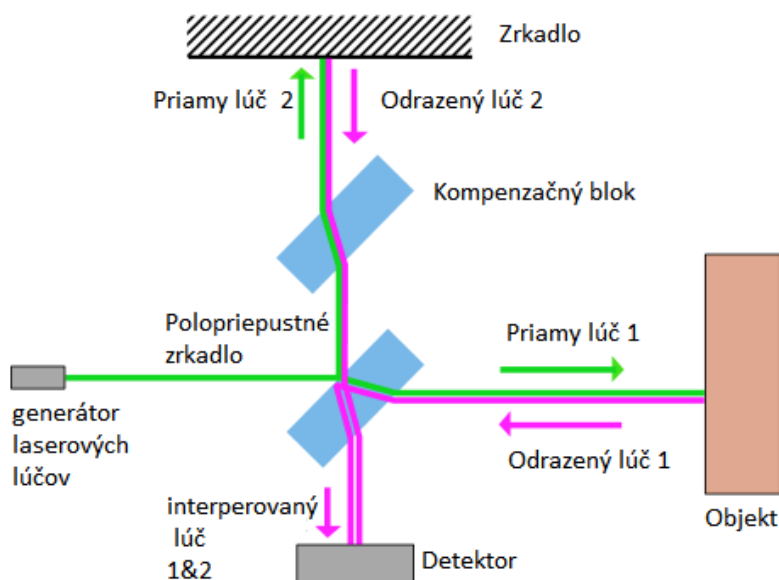
Druhou metódou je metóda triangulačná. Máme generátor laserových lúčov, ktorý produkuje samotné žiarenie, ktoré je stále reflektované objektom. Reflektované svetlo je centrovane pomocou šošoviek a dostáva sa až k optickému polohovému detektoru. Je tu detekcia pomocou pozičného detektoru, ktorá korešponduje so vzdialenosťou objektu znázornenom na Obr.56. Triangulačná metóda je presný opak metódy času letu. Nevýhoda tejto metódy je závislosť na zmenách teploty, čo môže spôsobiť silné žiarenie svetla na časť prístroja.



Obr. 56) Triangulačná metóda skenovania.



Tretia metóda je interferometrická metóda s dvomi lúčmi, pričom jeden cestuje dlhšiu trasu ako druhý. Ako je na Obr. 57 generovaný paprskový lúč dosiahne polo priepustné zrkadlo, kde sa delí na dve. Prvý lúč ide cez zrkadlo a je reflektovaný objektom a konzekventne polopriepustným zrkadlom a konečne dosahuje detektor. Druhý lúč je reflektovaný polopriepustným zrkadlom a potom ide cez kompenzačný blok a je reflektovaný zrkadlom v referenčnej vzdialenosti, potom dosiahne konečne na detektor. Kompenzačný blok je použitý preto, lebo prvý lúč ide cez sklo trikrát a druhý lúč len raz. Táto metóda je precízna meraním v rádoch mikrometroch a čiastočne v rádoch nanometrov. Nevýhoda je drahšia cena a komplexnosť prístroja [35].



Obr. 57) Interferometrická metóda 3D sken [35].

Poslednou metódou je metóda zmenou fázy ako metóda zložená z metódy času letu obohatená z interferometrickej metódy. V porovnaní s metódou času letu je rozdielna v tom, že laserový lúč má sínusovo modulovanú optickú silu. Reflektované svetlo je monitorované a modulácia je porovnávaná s odoslaným svetlom. Táto fázová zmena je proporčná času letu. Ako interferometer, kde fázová zmena zahŕňa meranie vzdialenosti a nárast je periodický. Akokoľvek je periodicitu v inteferometri vyššia, modulácia frekvencie je nižšia než optická frekvencia. Meraním modulácie dvoch rozličných modulačných frekvencií simultánne [35].

### 6.7.2 Výber skeneru: EinScan SP

Výber skeneru pre našu aplikáciu bol založený na nasledujúcich kritériách výberu:

- Cenová dostupnosť skeneru do 100 000 CZK
- Schopnosť skeneru nasnímať súčasti vybraného ručného skenera
- Metóda rotácie dielu: nechceme ručný skener
- Presnosť skenu: rády milimetrov



Obr. 58) (vľavo) sken a SW prevedenie výrobku, (vpravo) pohľad spredu [36].

Na Obr. 58 môžeme vidieť samotný scanner EinScan – SP a všetky technické parametre sú v tabuľke Tab. 8.

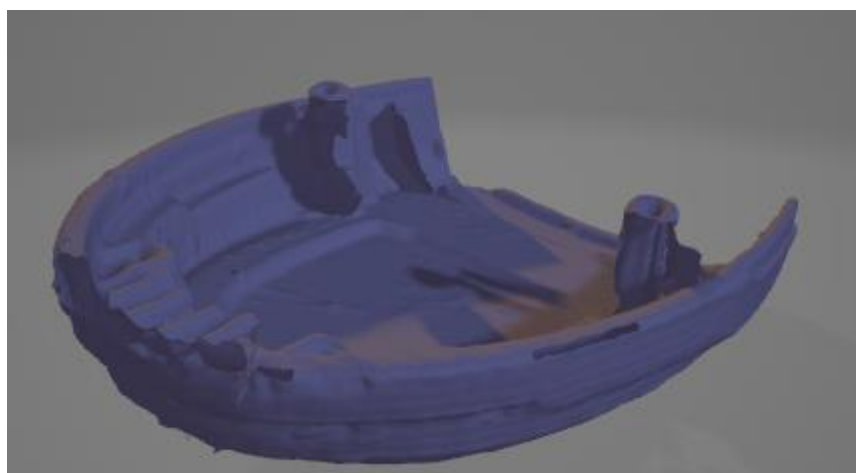
Parameter	EinScan- SP
Mód scanovania	auto sken
presnosť Jedného merania	do 0.05 mm
minimálny skenovaný objem	30x30x30 mm
maximálny skenovaný objem	1200x1200x1200 mm
rozsah jednotlivého záberu	200x150 mm
rýchlosť skenovania	do 4s
bodová vzdialenosť	0,17-0,2 mm
Textúra	áno
Formát súborov	OBJ, STL, ASC, PLY
Rozlíšenie kamery	1,3 mega pixelov
Svetelný zdroj	biele svetlo
Stand -off vzdialenosť	290-480 mm
grafická karta	Nvidia series (GTX 660 or higher) Graphic memory > 2G;
interface	1 × USB 2.0 or 3.0
windows	Win7, Win8, Win10 (64 bit)
CPU	Dual-core i5 alebo vyššie
RAM	>16 G
Váha	4.2 kg
Rozmery	570×210×210mm
Zdroj elektrickej energie	50W
vstupná voltáž	DC : 12 v, 3.33 A
kalibračná doska	HD
Otočný stôl	otočný stôl s markermi
maximálna hmotnosť obrobku	5 kg

Tab 8) Technická špecifikácia vybraného skeneru.

Proces skenovania je nasledujúci. Pri lesklých alebo inak reflexných povrchoch je nutné použiť antireflexný sprej, kde celý povrch prestriekame na meranie. Biele svetlo skenera vytvára pri procese skenovania body v priestore. Tie sa následne trianguláciou spoja a vzniká .stl model ako môžete vidieť na Obr. 59-60.



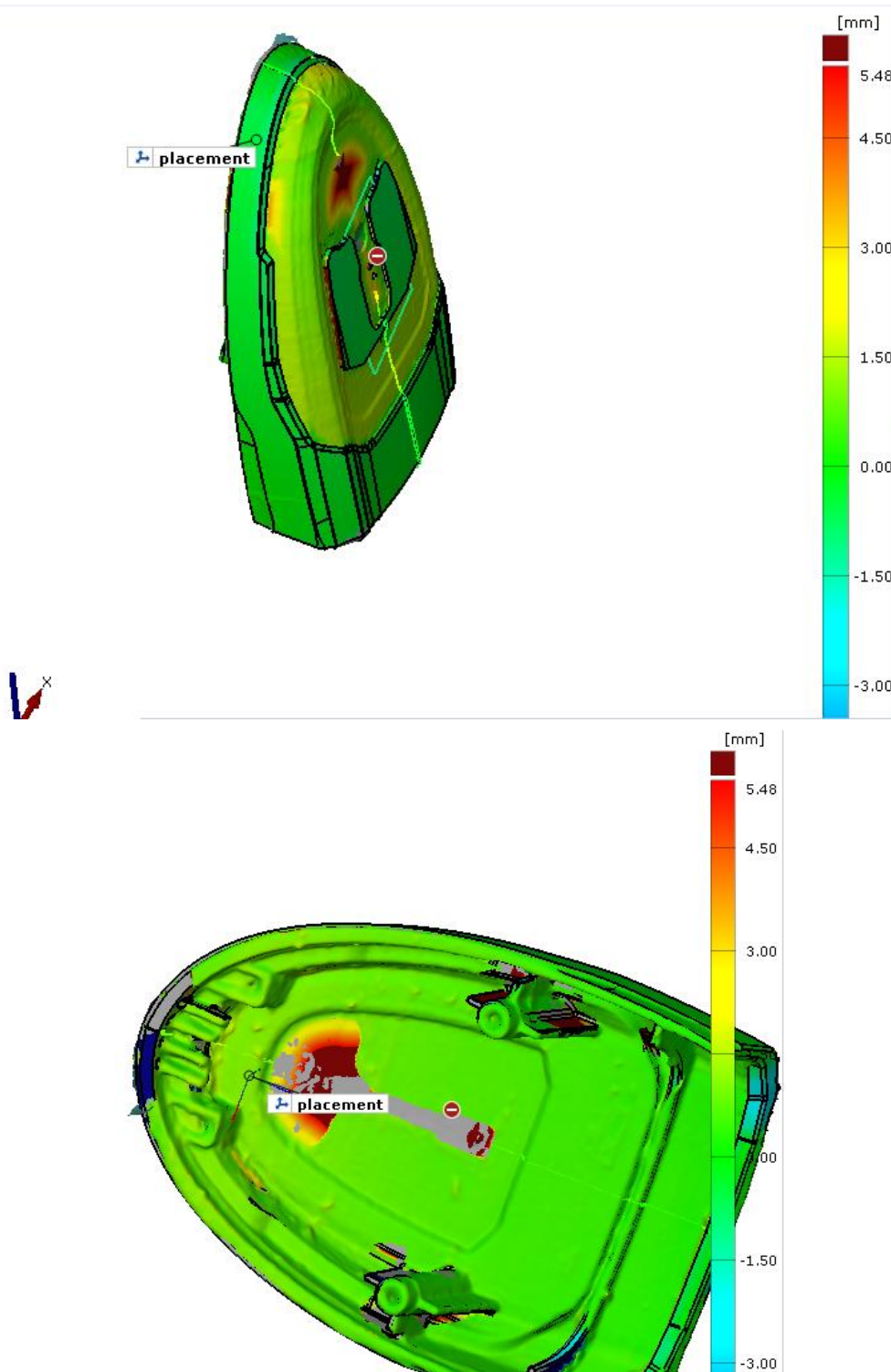
Obr. 59) Proces spracovania dát počas skenovania



Obr. 60) Finálne snímky produktu canopy.

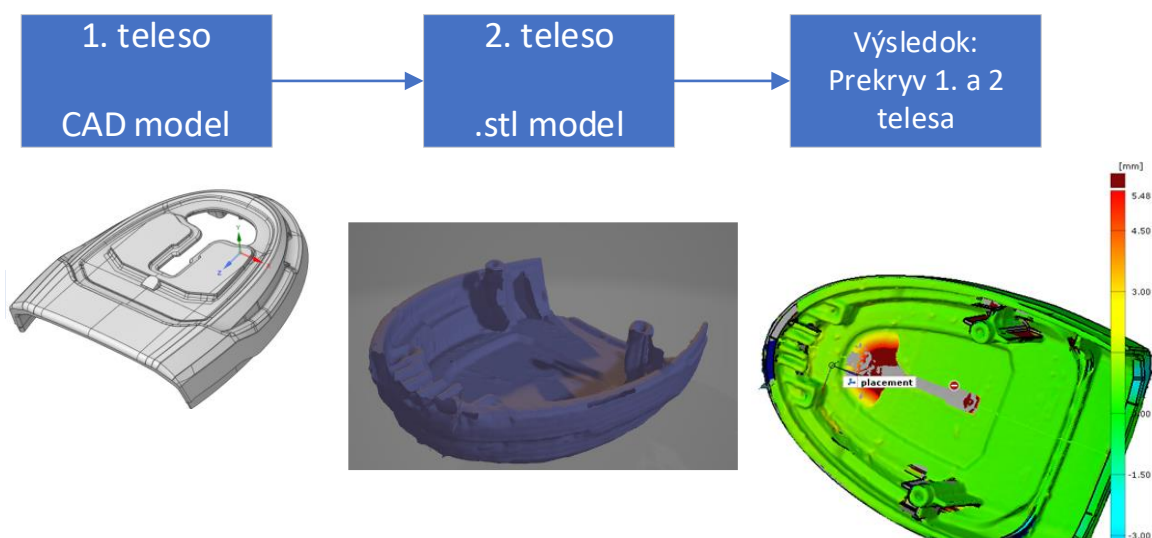
## 6.8 Porovnanie 3D scanu s CAD datami

Po zvolení komponenty sme prešli k nastaveniu 3D tisku. Po tisku sme dostali hotový produkt, z ktorého bolo nutné odstrániť podpory. V predchádzajúcej kapitole sme sa zoznámili s vybratým 3D skenerom, vďaka ktorému sme výsledok 3D tlače zoskenovali viz. Obr.61. Na ďalšiu analýzu sme využívali program GOM Inspect, ktorý dokáže porovnať CAD dáta a model ako dva zdroje, prekryť ich cez seba, tak aby sme mohli odčítať rozdiely v rozmeroch a vyhodnotiť presnosť nášho porovnávaného modelu.



Obr. 61) Vyhodnotenie rozmerovej presnosti CAD a 3D Sken

Obečne možno zhodnotiť, že sken dosahuje dobrú presnosť. Priemerná nepresnosť je do 1,5 mm pričom najväčšia nepresnosť je diera v modeli. Pozoruhodne presné sú okraje modelu kde sa blížime až identickej zhode modelu a 3D Skenu 3D tlačenej komponenty. Presný postup tvorby porovnania vzniká spojením CAD modelu a zoskenovaného .stl modelu viz. Obr.62.



Obr. 62) Postup tvorby porovnania

Súbory typu .stl obsahujú trojuholníkovú priestorovú mriežku pričom každý element má: 3 body (vertex) a 1 normálu (facet normal) ako môžeme vidieť na Obr. 63. Normála definuje orientáciu trojuholníka a pozíciu materiálu. Oproti CAD modelu kde sú definované priestory ako parametre, stl súbory definujú pomocou trojuholníkov. Zahŕňa informácie o vonkajšku či vnútre komponenty, preto je využívaný na 3D tlač.

```

facet normal -6.413651e-01 7.451808e-01 -1.826372e-01
  outer loop
    vertex -2.926430e+00 1.789538e+00 4.335345e+00
    vertex -2.925719e+00 1.790169e+00 4.335418e+00
    vertex -2.925682e+00 1.790121e+00 4.335093e+00
  endloop
  
```

Obr. 63) Príklad triangulačnej siete

V programe GOM Inspect sa prekrytie CAD súboru a skenovaného .stl súboru určil tak, že sme určili neutrálnu plochu a ďalej pomocou funkcie zjednotenia (z angličtiny „alignment“) na CAD súbore a funkcia upravila výsledok tak aby sedeli osi aj celý model sa prekryval. Minimum -0,4570 mm v odchýlke a maximum 0,4503 mm.

## 6.9 Vplyv designových parametrov na cenu nákladov

Vybraný diel – canopy je funkčným dielom krytia ručného skenera do rozmerov 30x30x30 mm. Bol vybraná tak, aby bolo možné identifikovať viaceré detaily a vidieť aj presnosť tlače. Cena 3D tlače sa skladá z významných komponent:

- Cena elektrickej energie
- Cena materiálu = filamentu
- Náklady na tlačiareň

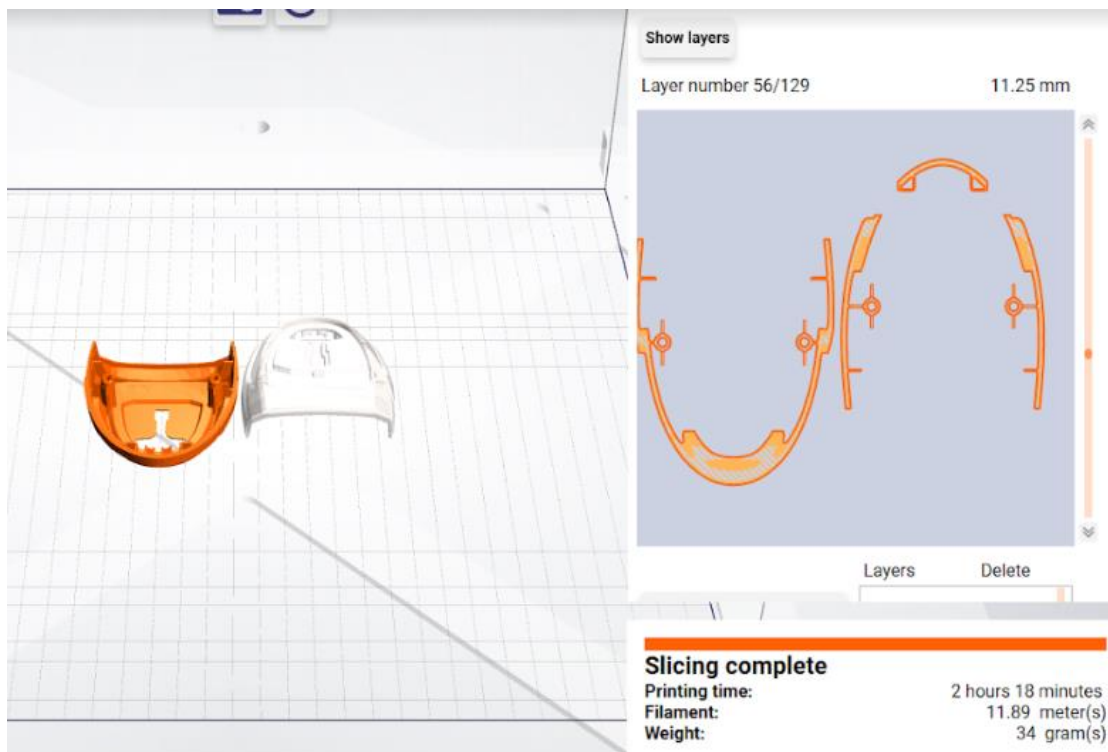
Cena 1 kWh 7,15 CZK... to pre našu spotrebu bude 20 CZK/ hod. Cena nákladov na tlačiareň sa pohybuje v rozmedzí 50-150 CZK [37].

Veľký vplyv na náklady majú podporný materiál a jeho typ a samotné rozloženie dielu v priestore:

### Porovnanie rýchlosti tlače využitím rôznych podpor

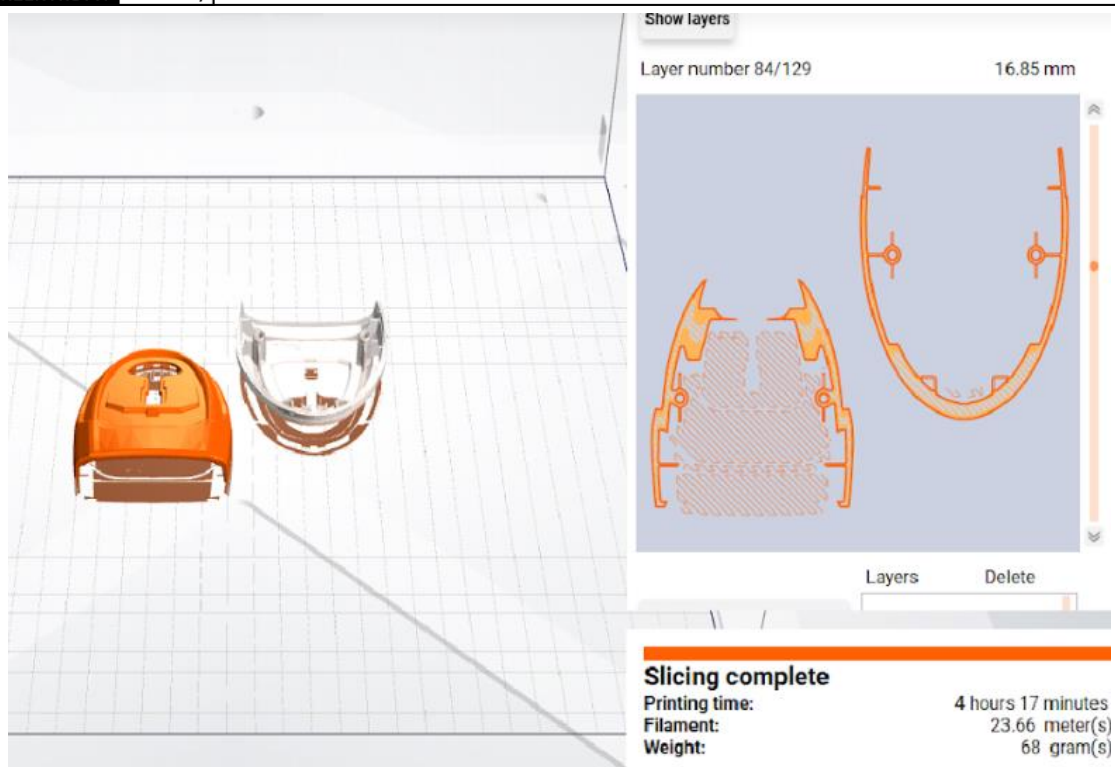
<u>Typ podpory</u>	<u>Rýchlosť tlače</u>
<i>Bez podpory</i>	2h 18 min
<i>Štandardná podpora</i>	4h 10 min
<i>Maximálna podpora</i>	4h 17 min

Tab 9) Porovnanie rýchlosti tlače

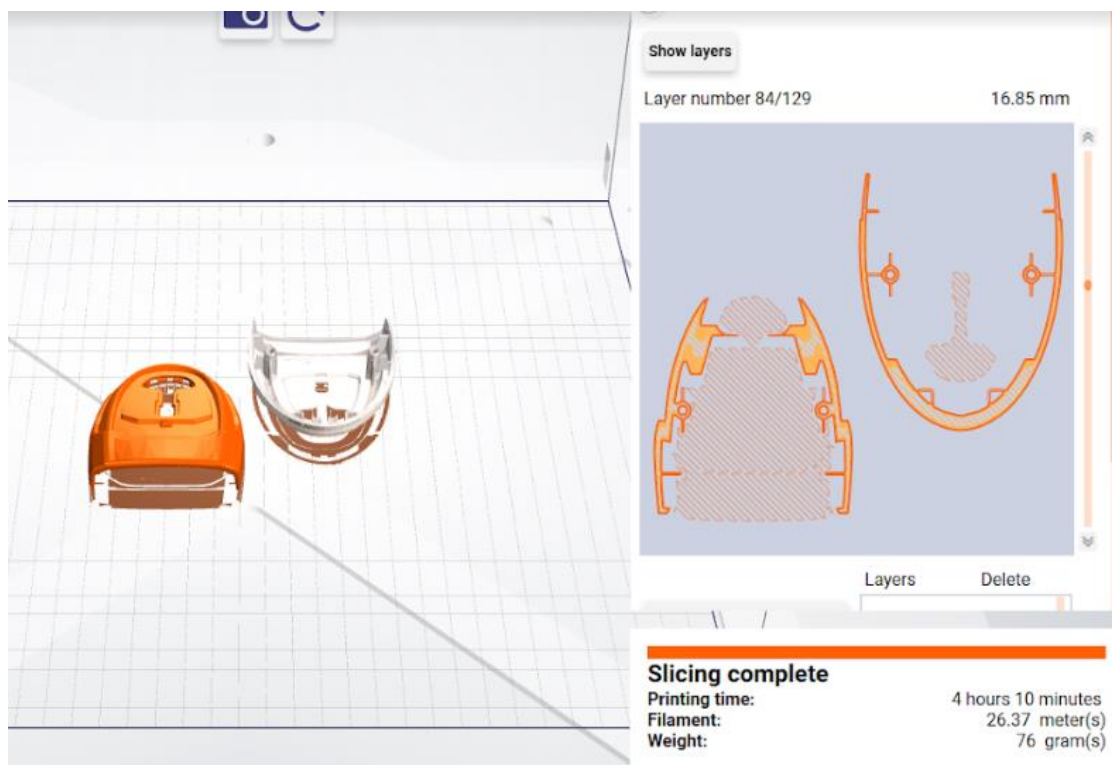


Obr. 64) CAD model bez podpor



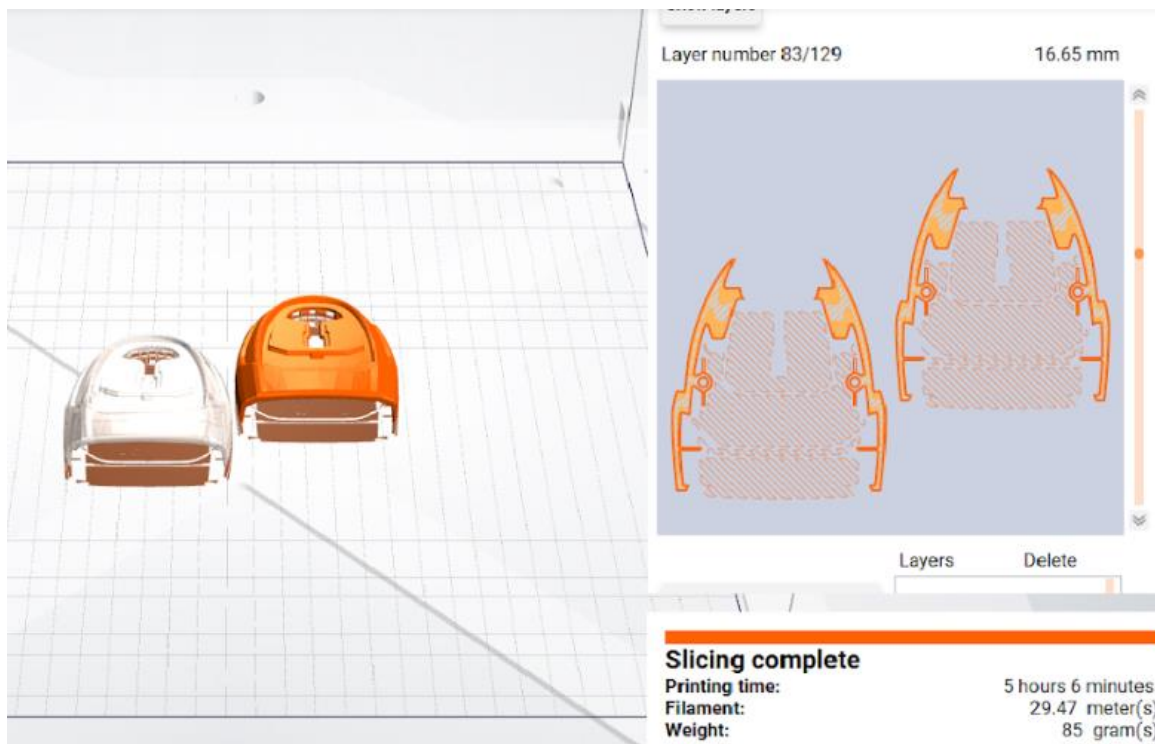


Obr. 65) CAD model s podporami

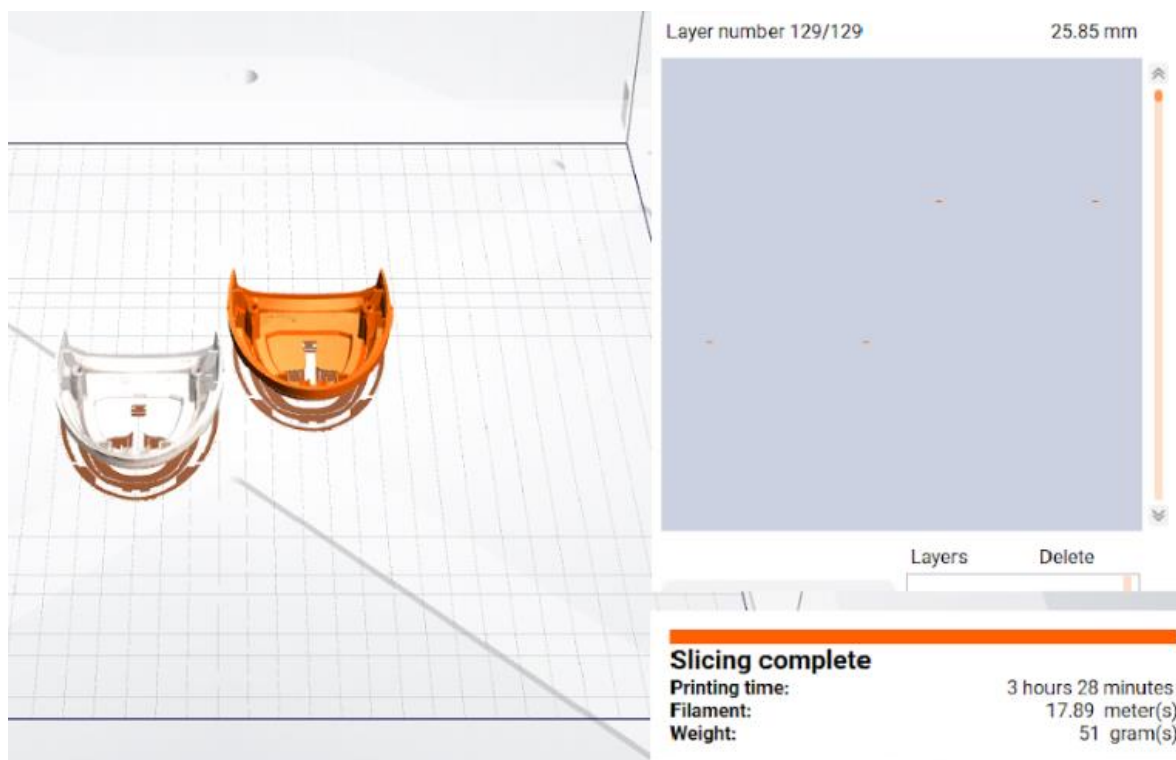


Obr. 66) CAD model s ½ podporami

Ďalším významným parametrom pri tlači okrem použitia podpor je orientácia súčasti v priestore a hlavne výška v ose Z. Ak chceme eliminovať čas tlače, je nutné sa zamyslieť nad orientovaním súčasti.



Obr. 67) Orientácia súčasti do osy Z



Obr. 68) Plochá orientácia modelu v XY osách

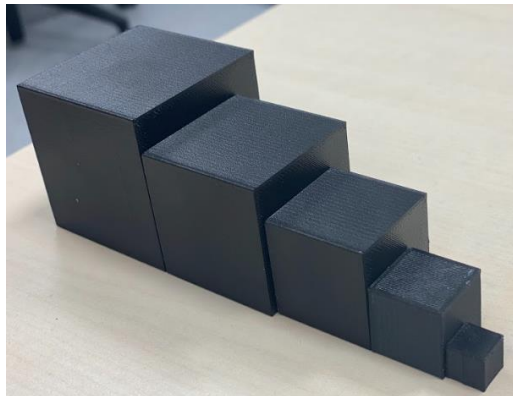
Ako môžeme vidieť na Obr. 67 a 68 čas tlače je pri správnom rozložení o 1,5 hodiny kratší.



Pre potrebu zbierania dát a overenie presnosti sme zvolili nasledujúci experiment. Vytlačili sme 5 kociek, z karbon ABS materiálu, s rôzne dlhými hranami od 10 mm po 50 mm vid' Obr. 69. Následne sme každý rozmer a, b, c merali digitálnym posuvným meradlom trikrát a výsledný nameraný rozmer je priemerom nameraných hodnôt.

Obecne môžeme tvrdiť, že pre výšku a teda os z je nepresnosť výsledného rozmeru najväčšia a čím máme kosičku väčšiu, tým je chyba väčšia. Pri najväčšej kocke je to až 49,24 mm čo je o -0,66 mm menej ako očakávame. Tieto nepresnosti sú spôsobené a vplyvajú na tlač viaceré vlastnosti:

- Nastavenie 3D tlačiarne
- Priemer použitej trysky
- Presnosť .step súboru
- Použitým materiálom a jeho vlastnosťami



Obr. 69) Meranie presnosti na modelových carbon ABS kockách

kocka 1				
	meranie 1	meranie 2	meranie 3	priemer
<b>b</b>	49,90	50,00	50,05	49,98
<b>a</b>	50,15	50,02	50,07	50,08
<b>c</b>	49,08	49,82	48,83	49,24

kocka 2				
	meranie 1	meranie 2	meranie 3	priemer
<b>b</b>	40,25	40,30	40,25	40,27
<b>a</b>	40,16	40,10	40,09	40,12
<b>Dc</b>	40,09	39,94	39,82	39,95

Tab 10) Meranie rozmerov kocky a=50 mm, a=40 mm

V rámci pokusu sme najväčšiu kocku zobrali a zväčšili výšku o potrebný rozdiel do 50,00 mm podľa merania o 0,76 mm a výsledné meranie ukázalo zlepšenie presnosti na 49,96 mm.

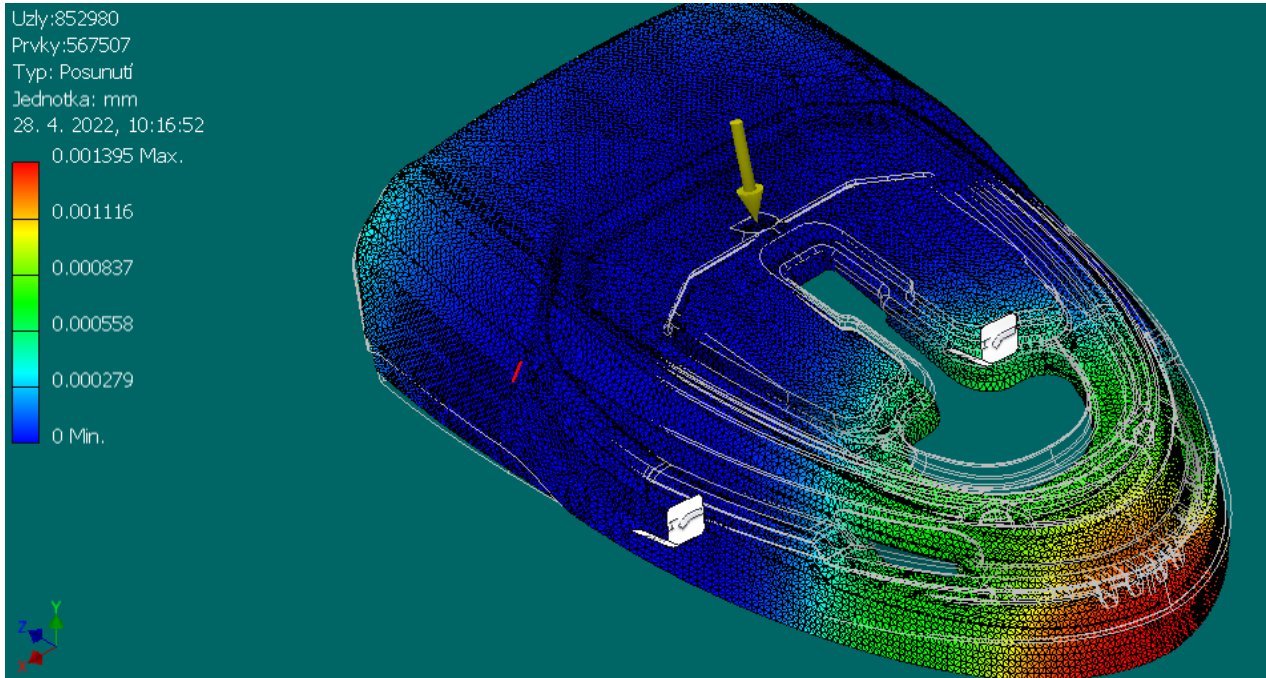
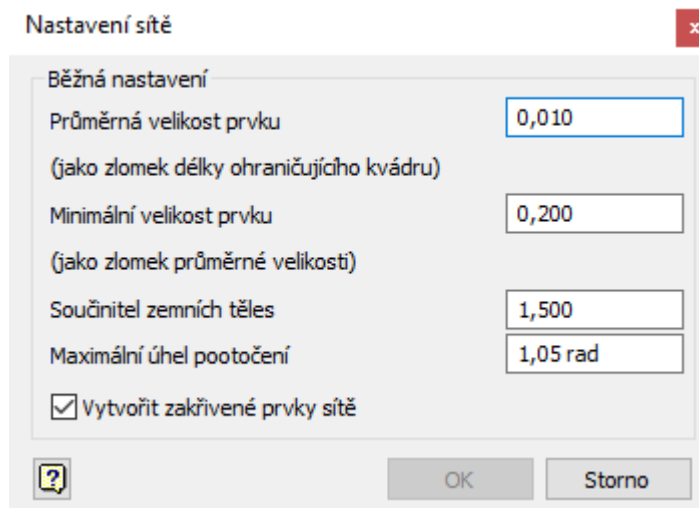
kocka 1 – zväčšená parameter z				
	meranie 1	meranie 2	meranie 3	priemer
<b>c</b>	50,02	49,91	49,94	49,95666667

Tab 11) Zväčšené parametre kocky 1

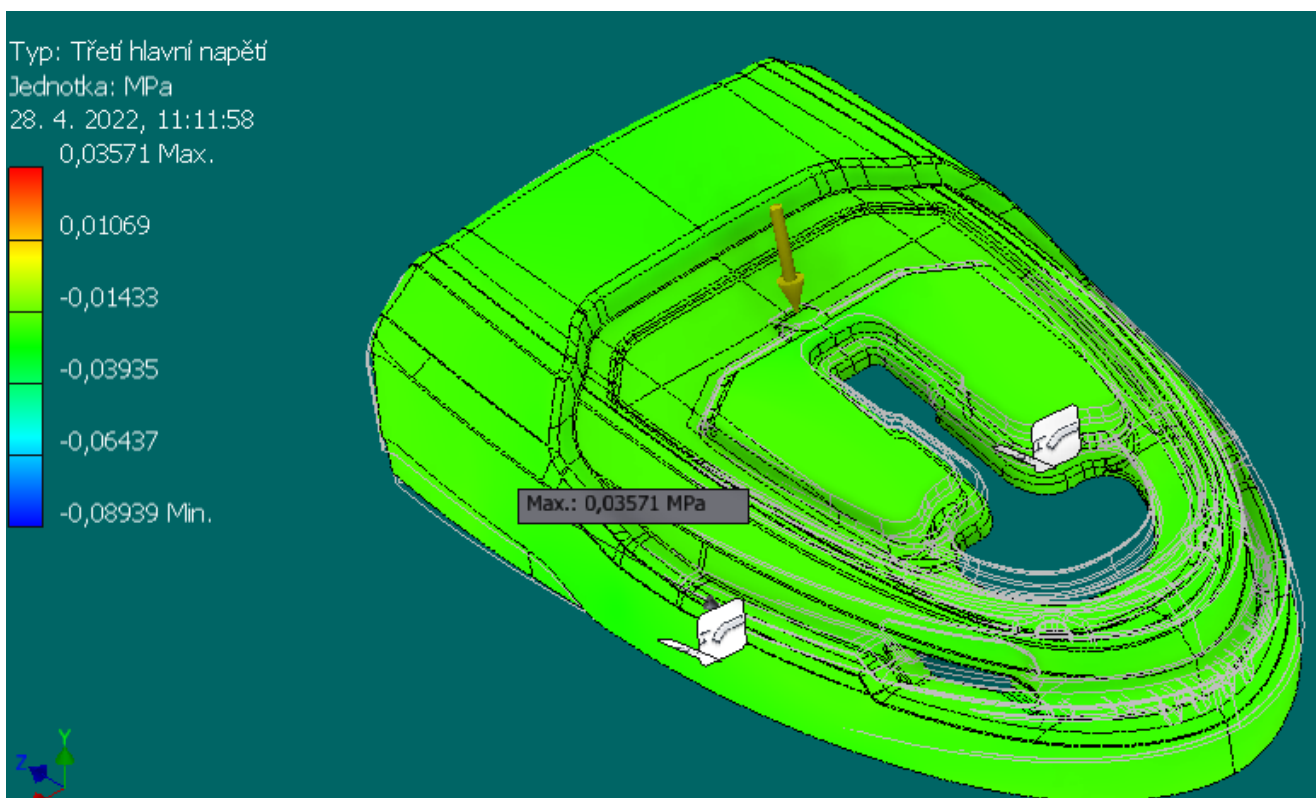
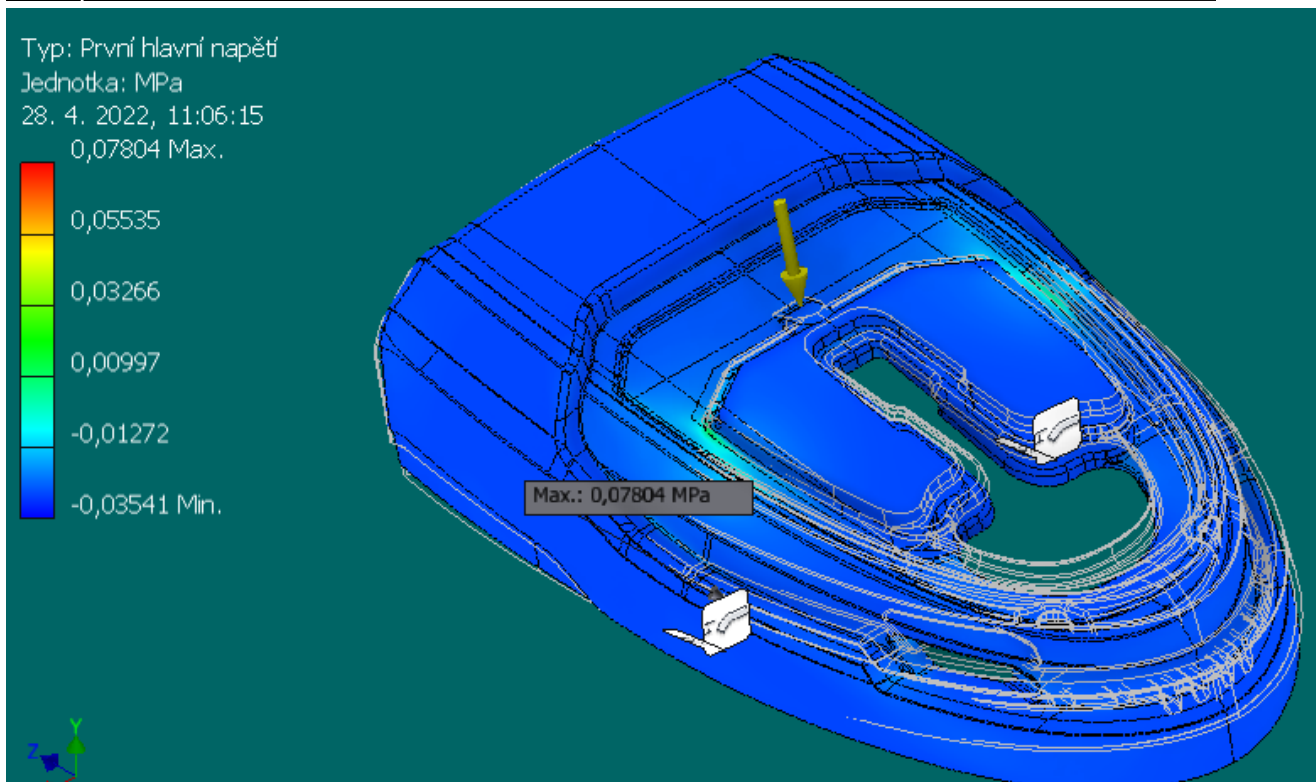
## 6.10 Vplyv designových parametrov na mechanické vlastnosti

Mechanické namáhanie je súčasťou zistení o mechanických vlastnostiach skúmanej súčasti či zostavy. V našom ponímaní berieme do úvahy diel canopy, ktorý podrobíme simulácii napätia. Najskôr zvolíme veľkosť elementu mriežky – 0,01 mm ako zlomok dĺžky ohraničujúceho kváдру. Maximálna veľkosť prvku 0,2 mm.

Ďalej zvolíme miesto zaťaženia gravitácie a fixné väzby podpory. Celkovo v našom riešení je použitých 265 749 uzlov a 168 178 prvkov v rozhraní programu AUTODESK Inventor 2022. Posunutie pod zadaným zaťažením dosahuje maximálnej hodnoty 0,0011385 mm na vrchole súčasti a naopak najmenšie skoro 0 posunutie je na opačnej strane súčasti.



Obr. 70) (hore) parametre použitej mriežky, (dole) priebeh posunutí na komponente.



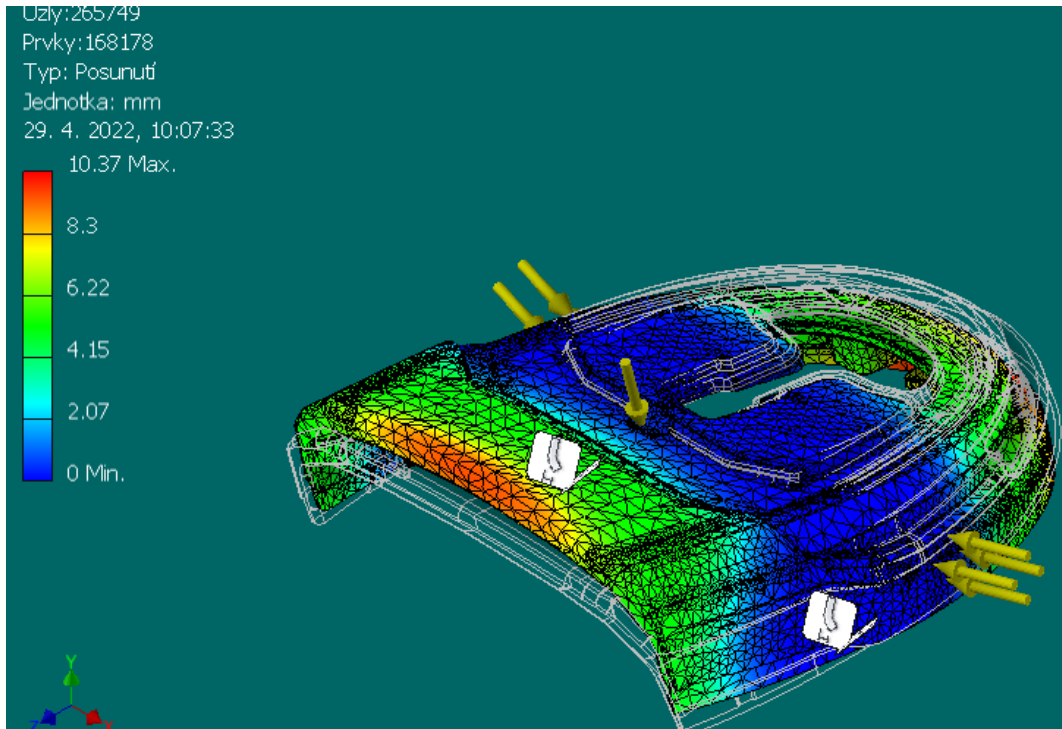
Obr. 71) (hore) Priebeh prvého hlavného napätia, (dole) priebeh tretieho hlavného napätia

Priebeh prvého hlavného napätia 0,07804 MPa je maximálna dosiahnutá hodnota. Priebeh tretieho hlavného napätia dosahuje maximálnu hodnotu 0,03571 MPa ako je na Obr. 71. Napätie Von Mises z analýzy vychádza nulové a súčiniteľ bezpečnosti 15.

V modelovej úlohe 2 sme zvolili zaťaženie typu:

- Gravitácia v ťažisku
- Tlak na okrajoch = sila, ktorou pôsobí človek pri montovaní súčiastky ako celku

Priebeh výsledkov štúdie na posunutí je znázornený na Obr. 72. Maximálne posuvy sú v hodnotách 10,37 mm a prvé hlavné napätia v hodnote -222,7 MPa.



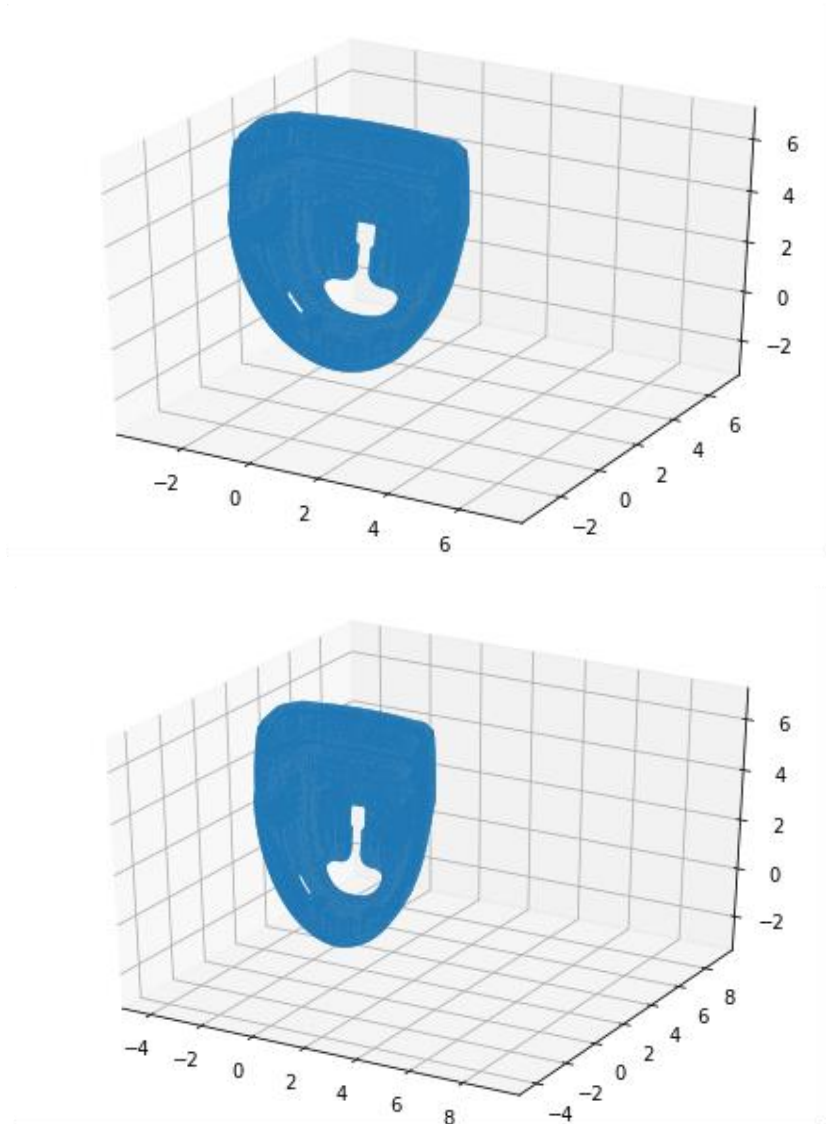
Obr. 72) Posunutie dielu v štúdii č.2

	Štúdia 1 – len gravitácia	Štúdia 2 – tlak + gravitácia
<b>Napätie Von Misses [MPa]</b>	(0 – 0,037)	(0-26)
<b>Prvé hlavné napätie [MPa]</b>	(-0,006 – 0,05174)	(-8,78 -21,56)
<b>Posunutie [mm]</b>	(0- 5,374e-04)	(0-10,37)
<b>Súčiniteľ bezpečnosti</b>	15	(0,77 – 15)

Tab 12) Prehľad mechanických vlastností komponenty

## 6.11 Aplikácia úpravy designu

Pre potreby tvorby jednoduchej aplikácie, ktorá model predĺži v potrebných smeroch podľa orientácie priemyselnej komponenty bol využitý programovací jazyk Python a jeho rozhranie Numpy STL. Toto rozhranie pracuje so súbormi v stereolitografickom tvare .stl. Naša problematika spočívala v nahrať súboru a jeho modifikácii v potrebných osiach, tak aby výsledný produkt bol vyrobiteľný čo najrýchlejšie a najlacnejšie. Na základe pokusu s kockami a porovnaním so súčasťami namáhané zaťažené gravitáciou vyšlo, že je nutné „doplniť“ približne 30% v rámci osy z, aby sme dosiahli požadovanú veľkosť dielu. Toto nám rieši práve spomínaný program na Obr. 74, kde výsledky môžeme vidieť aj graficky na Obr.73.



Obr. 73) (hore) diel Canopy pred úpravou, (dole) diel po úprave



```
from stl import mesh
from mpl_toolkits import mplot3d
from matplotlib import pyplot

# Create a new plot
figure = pyplot.figure()
axes = mplot3d.Axes3D(figure)

# Load the STL files and add the vectors to the plot
your_mesh = mesh.Mesh.from_file('canopy.stl')
axes.add_collection3d(mplot3d.art3d.Poly3DCollection(your_mesh.vectors))

import numpy as np
from stl import mesh

def mesh_scale(my_mesh, scale_x, scale_y, scale_z):
    my_mesh.x = my_mesh.x * scale_x
    my_mesh.y = my_mesh.y * scale_y
    my_mesh.z = my_mesh.z * scale_z
    return my_mesh

# Auto scale to the mesh size
scale = your_mesh.points.flatten()
axes.auto_scale_xyz(scale*1.3, scale*1.3, scale)

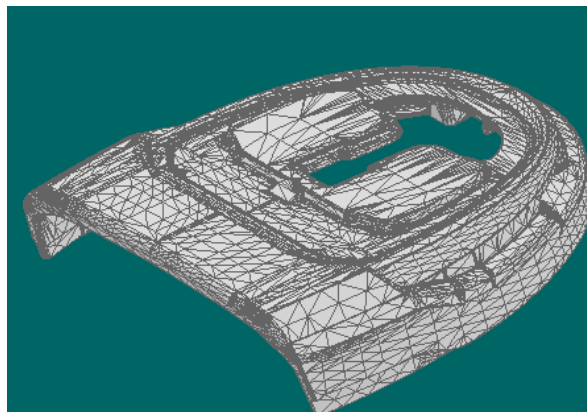
# Show the plot to the screen
pyplot.show()

your_mesh.save('new_stl_file.stl')
```

Obr. 74) Kód v jazyku Python s nastavením parametrov úpravy [38]

Program najskôr načíta používané knižnice, ďalej potom:

- vytvorí priestor pre nový graf,
- načíta náš STL súbor a pridá vektory do grafu,
- škáluje sa objekt aj s veľkosťou mriežky,
- načíta 3D grafu ako výsledkov,
- uloží nového súboru upravený súbor.

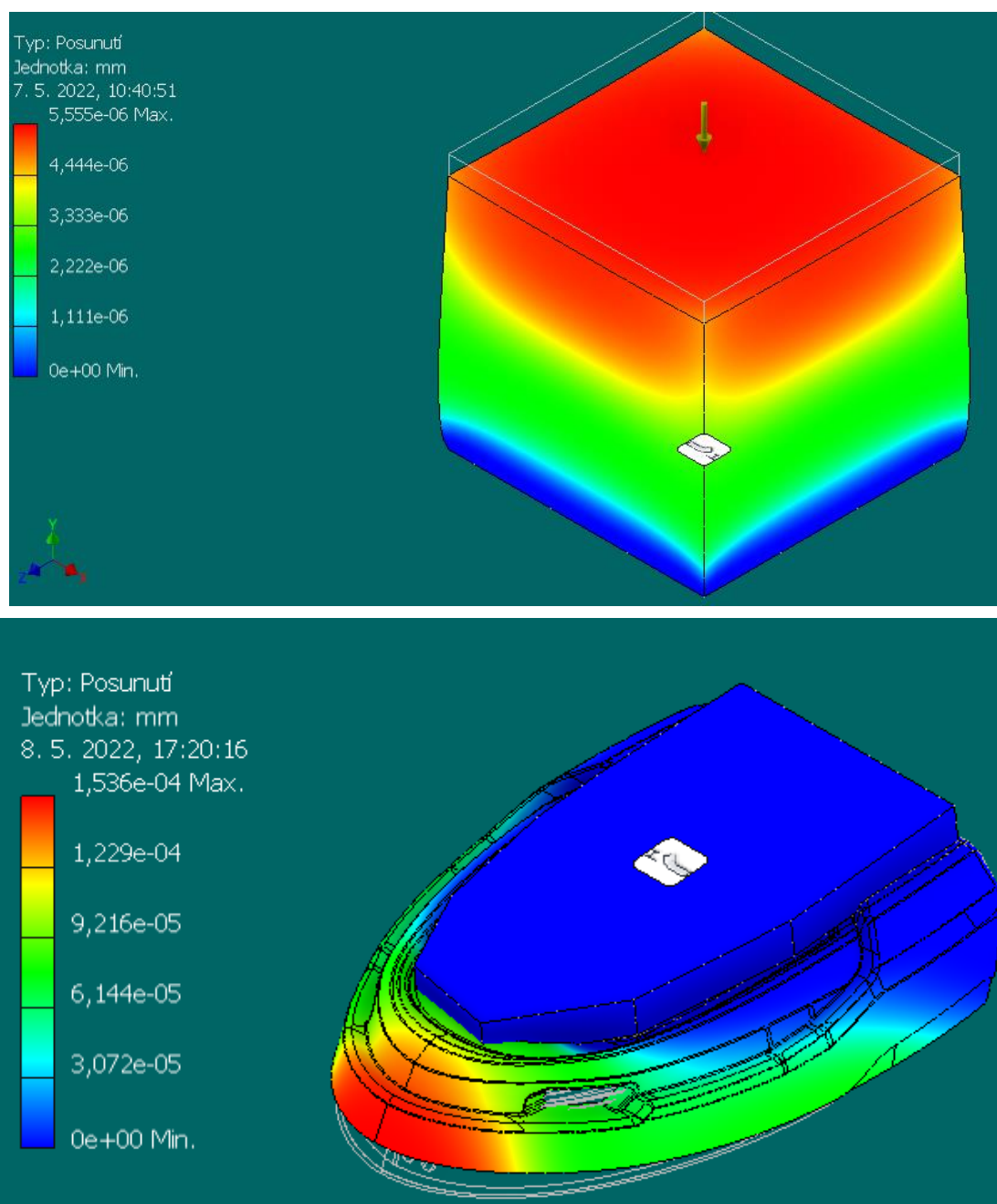


Obr. 75) Výsledný upravený súbor

## 6.12 Overenie hypotézy

Engineering 4.0 je v podniku možné využiť pre riešenie našej problematiky tak, že pomocou nástroja metódy konečných prvkov určíme plochy, ktoré vplyvom gravitácie budú stlačené a my vieme predpokladať o aký parameter lineárny sa zmení náš predmet. Gravitácia má vplyv na ukladanie jednotlivých vrstiev 3D tlače, tým, že nám stláča jednotlivé vrstvy. Pre kocku s hranou  $a=50$  mm je toto zbornie vrstvy  $0,76$  mm ako je uvedené v kapitole 6.9. Vplyv gravitácie je  $5,55e-06$  posunutia, z čoho nemôžeme potvrdiť hypotézu, takže gravitácia má vplyv na presnosť súčasti, ale nie je jediným vplyvom, vzhľadom na rozdiel veľkosti v rádoch.

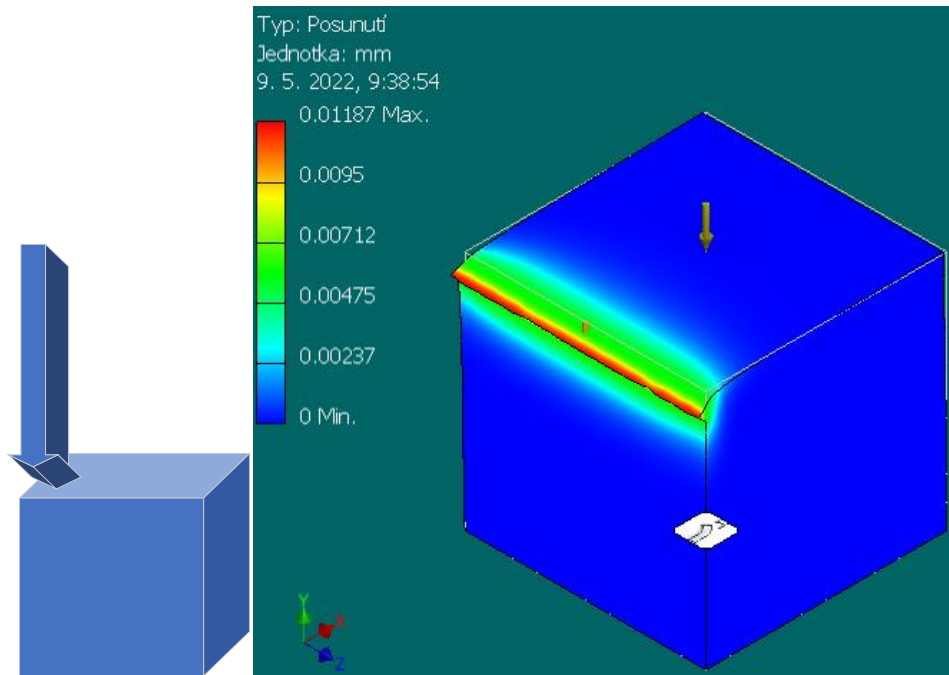
Pre sledovanú priemyselnú komponentu by mal byť priehyb, teda posunutie najväčšie v diere ako to podporuje aj výstup zo skenovanej súčasti, kde je maximálna diferencia sústredená v diere modelu.



Obr. 76) Posunutie pod gravitačnou záťažou (hore) kocka, (dole) vybraný diel

Simulácia posunutia gravitačnou záťažou obsahuje na sebe n-uholníkové objemové teleso ktoré predstavuje podporu telesa po 3D tlači. Tým pádom hypotéza, že by sa dalo jednoducho simulovať procesy počas tlače, pôsobením iba gravitácie sa nepotvrdila. Aby bolo meranie pravdivé, museli by sme simulovať vrstvu po vrstve, zahrnúť tepelné vlastnosti materiálu a mať matematický model. To z ekonomického hľadiska, kedy môžeme vytlačiť verifikačné meranie kocku je rýchlejšie ako simulácia vrstva po vrstve.

Ďalej sme merali deformáciu v x, y, a z smere na modelovej kocke zaťaženej silou  $F=100N$  voľne položennej na doske vid' Obr. 76, tak aby sme určili trendovú spojnicu a získali tak predpis pre priebeh deformácie v jednotlivých osách.

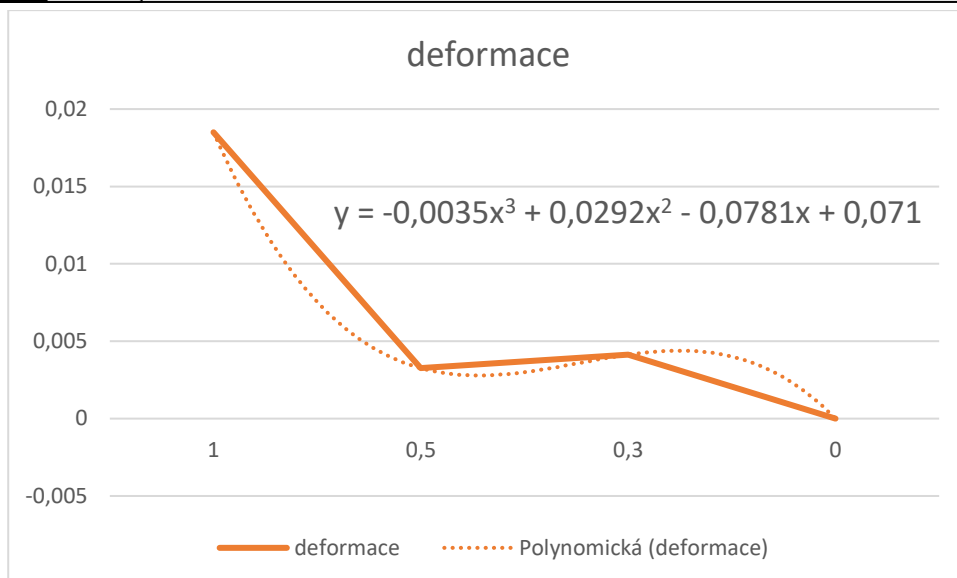


Obr. 77) Prehľad zaťaženia kocky silou F (vľavo), veľkosť posunutia v mm (vpravo)

x	deformácia
1	0,0185
0,5	0,00326
0,3	0,00413
0	0
<b>y</b>	
0	0,02134
0,5	0,01971
0,3	0,02196
1	0,02016
<b>z</b>	
0	0,00844
0,3	0,002814
0,5	0,001485
1	0

Tab 13) Tabuľka nameraných dát deformácií v osách x,y,z





Obr. 78) Grafické zobrazenie nameraných dát s polynomickou trendovou spojnicou

Z grafického zobrazenia nameraných dát na Obr.78 sme postupovali tak, že v každom smere sme kocku pod záťažou zrezali a z nich sme dostali matematický model, predpis funkcie.

**Pre rez v smere x:**  $y = -0,0035x^3 + 0,0292x^2 - 0,0781x + 0,071$

**Pre rez v smere y:**  $y = -0,0013x^3 + 0,0099x^2 - 0,022x + 0,0348$

**Pre rez v smere z:**  $y = 0,0007x^3 + 0,0066x^2 - 0,0202x + 0,0228$

Ďalej rovnice vložíme do jednoduchej aplikácii, aby sme získali deformované teleso.

```

from stl import mesh
from mpl_toolkits import mplot3d
from matplotlib import pyplot
import numpy as np

# Create a new plot
figure = pyplot.figure()
axes = mplot3d.Axes3D(figure)

#load stl files my mesh
my_mesh =mesh.Mesh.from_file('canopy.stl')
axes.add_collection3d(mplot3d.art3d.Poly3DCollection(my_mesh.vectors))

def mesh_scale(my_mesh, scale_x, scale_y, scale_z):
    my_mesh.x =((scale_x**3)*-0.0035+(scale_x**2)*-0.0292-0.0781*scale_x+0.071)
    my_mesh.y =((scale_y**3)*-0.00013+(scale_y**2)*0.0099-0.022*scale_y+0.0348)
    my_mesh.z =((scale_z**3)*-0.0007+(scale_z**2)*0.0066-0.0202*scale_z+0.0228)
    return my_mesh

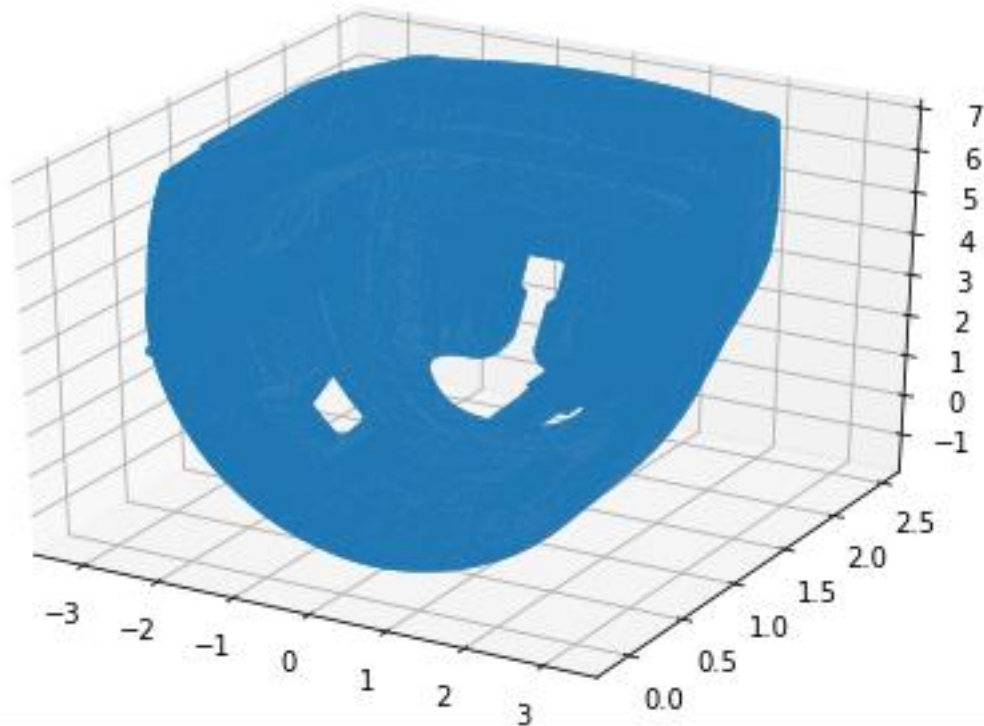
# Auto scale to the mesh size
scale = my_mesh.points.flatten()
axes.auto_scale_xyz(my_mesh.x,my_mesh.y,my_mesh.z)

# Show the plot to the screen
pyplot.show()
my_mesh.save('your_model.stl')

```

Obr. 79) Zdrojový kód aplikácie

Výsledné těleso deformované:



Obr. 80) Deformované těleso, s nenormalizovanými osami x,y,z

Na normalizovanom dieli bolo dokázané, že je možné upraviť diel tak, aby mechanicky sedel lepšie na zvyšok súčasti. Tvarovo komplikované diely je možné pomocou prediktívneho modelu upraviť tak, aby sa tlačili presnejšie. Hypotézu, že sme schopní predikovať tvar dielu numerickou simuláciou, ktorá bude dostatočne zjednodušená, kde na základe 3D scenovaného dielu a rovnomerných odchýliek upravím model. Hypotézu týmto potvrdzujem. Je možné urobiť tvarovú kalibráciu tvarovo zložitejších dielov, kde sa počíta, že 3D tlač bude vykazovať stabilnú odchýlku. Fyzický test bol urobený aj na modelovej kocke a táto lineárna úprava navýšila presnosť dielu v rádoch milimetrov.

## 7 ZÁVER

V diplomovej práci som vyriešila:

- Systematickým prístupom je spracovaný prehľad súčasného stavu poznania, kde som sa zamerala na optimalizačnú úlohu, algoritmy určené pre optimalizáciu designu, prehľad metód 3D tlače podľa normy.
- Porovnanie vhodnosti metód 3D tlače SLA a FDM, kde bolo určené základné porovnanie metód, ekonomické porovnanie nákladov na prevádzku a boli navrhnuté usporiadania pracovných buniek.
- Vybranú FDM metódu bola analyzovaná na konkrétnej tlačiarni, pre ktorú je vyhotovená analýza rizík od identifikácie relevantného nebezpečenstva, cez zoznam a analýzu významných nebezpečenstiev po znižovanie rizík.
- Testovaním presnosti tlače a kalibrácii bolo zhotovené porovnanie materiálov ABS, PLA a PET-G s čím najlepší ABS bol ďalej zvolený ako východzí materiál.
- Boli určené kritéria výberu priemyselnej komponenty a následne vybraná priemyslová komponenta na základe zvolených kritérií.
- Boli odsledované a identifikované chyby pri 3D tlači a popísaný agilný vývoj praktickej časti práce.
- V oblasti 3D skenovania boli popísané jednotlivé metódy, zvolené boli kritéria výberu skeneru aj popísaná voľba.
- Zhotovený výstup je porovnanie 3D skenu s CAD dátami, kde sme určili kritické miesta rozdielov a zároveň zhodu medzi skenom a CAD súborom.
- Boli určené vplyvy designových parametrov, v našom prípade vplyvy podpory, a orientácie dielu na podložke na cenu nákladov.
- Následne boli určené vplyvy designových parametrov, v našom prípade aj rôzne druhy namáhania, na mechanické vlastnosti.
- Vyvinula sa jednoduchá aplikácia v jazyku Python, ktorá upraví parametre dielu v ose x,y,z podľa potreby a uloží nový diel do súboru .stl
- Overili sme gravitačnú hypotézu na dieloch pomocou MKP analýzy a výstupov skenovaných dielov sme zistili, že nie je možné jednoducho určiť z pôsobenia gravitácie na diel.
- Overili sme numerickú hypotézu, kde sme pomocou rovnomerných odchýliek určili matematický model posunu a zistili sme, že je možné takto aproximovať diel.



## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] OWOYELE, Opeoluwa, Pinaki PAL a Alvaro Vidal TORREIRA. An Automated Machine Learning-Genetic Algorithm Framework With Active Learning for Design Optimization. *Journal of Energy Resources Technolog.* 2021, 10. Dostupné z: doi:10.1115/1.4050489
- [2] FREEDMAN, David A. *Statistical Models: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. ISBN 1139477315.
- [3] GOLDBERGER, Arthur S. *Classical Linear Regression: Econometric Theory*. [online]. New York: New York: John Wiley, 1964 [cit. 2022-02-24]. ISBN 0-471-31101-4. Dostupné z: <https://archive.org/details/econometrictheor0000gold/page/158/mode/2up>
- [4] YAN, Xin a Xiao Gang SU. *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*, [online]. Singapore: World Scientific, 2009 [cit. 2022-02-25]. ISBN 9789812834119. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=MjNv6rGv8NIC&printsec=frontcover&dq=\),+Linear+Regression+Analysis:+Theory+and+Computing&hl=en&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=\)%2C%20Linear%20Regression%20Analysis%3A%20Theory%20and%20Computing&f=false](https://books.google.cz/books?id=MjNv6rGv8NIC&printsec=frontcover&dq=),+Linear+Regression+Analysis:+Theory+and+Computing&hl=en&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=)%2C%20Linear%20Regression%20Analysis%3A%20Theory%20and%20Computing&f=false)
- [5] *Math Works: Polyfit* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html;jsessionid=fc47ddefdca079ab7995c69e0f34>
- [6] LIKEŠ, Jiří a Josef JOSEF MACHEK. *Matematická statistika*. SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1983, s. 180. ISBN -.
- [7] Linear regression. *Wikipedia* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_regression#cite\\_note-26](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_regression#cite_note-26)
- [8] All Machine Learning Models Explained in 5 Minutes: Types of ML Models Basics. *Youtube* [online]. 16.05.2020 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yN7ypxC7838>
- [9] HARASYMCZUK,, Matt. Python: from None to Machine Learning. *Python Astrotech* [online]. 2022 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://python.astrotech.io/machine-learning/introduction/datasets.html>
- [10] *Analýza hlavních komponent: Ekonometrie* [online]. Brno, 2019 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: [https://k101.unob.cz/~neubauer/pdf/ekon\\_PCA.pdf](https://k101.unob.cz/~neubauer/pdf/ekon_PCA.pdf). Prezentácia. Katedra ekonometrie FVL UO Brno. Vedoucí práce Jiří Neubauer.
- [11] Simulation Driven Design Optimization: Modeling and Simulation - The Challenge. *Spaceclaim* [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: [http://www.spaceclaim.com/en/Solutions/Design/Simulation\\_Driven\\_Design.aspx](http://www.spaceclaim.com/en/Solutions/Design/Simulation_Driven_Design.aspx)
- [12] BROATCH, Alberto, Ricardo NOVELLA, Josep GÓMEZ-SORIANO, Pal PINAKI a Sibendu SOM. Numerical Methodology for Optimization of Compression-

- Ignited Engines Considering Combustion Noise Control. *SAE Int. J. Engines*. 2018, 1. vydání(01), 19. ISSN 946-3936. Dostupné z: doi:0.4271/2018-01-0193
- [13] *Design of Experiments* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Design\\_of\\_experiments](https://en.wikipedia.org/wiki/Design_of_experiments)
- [14] CLERC, M. *Theory to Practice in Particle Swarm Optimization; Handbook of Swarm Intelligence; Springer Berlin Heidelberg*. 8. vydání. Heidelberg: Springer Berlin, 2010. ISBN 978-3-642-17390-5.
- [15] What Is Finite Element Analysis (FEA)?. *Mathworks* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/discovery/finite-element-analysis.html>
- [16] *Metóda konečných prvků* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/brozovsky/data/mkp/p1.pd> f. Prezentácia prednášky. Vysoká škola Baňská - Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jiří Brožovský.
- [17] *Wikipedia* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)
- [18] Applied Element Method. *Welcome to Applied Element Method* [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.applielementmethod.org/>
- [19] Hp-FEM. *Wikipedia* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hp-FEM>
- [20] Code: ABAQUS CPFEM. *ICME HPC MSSTATE* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: [https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/Code:\\_ABAQUS\\_CPFEM.html#:~:text=Crystal%20Plasticity%20Finite%20Element%20Method%20CPFEM%20is%20based,by%20dislocation%20slip%20which%20is%20simulated%20using%20CPFEM.](https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/Code:_ABAQUS_CPFEM.html#:~:text=Crystal%20Plasticity%20Finite%20Element%20Method%20CPFEM%20is%20based,by%20dislocation%20slip%20which%20is%20simulated%20using%20CPFEM.)
- [21] BEIRAO DA VEIGA, L., Franco BREZZI, Andrea CANGIANI a G. MANZINI. Basic principles of Virtual Element Methods. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 2012, **November**, 17. Dostupné z: doi:10.1142/S0218202512500492
- [22] Polyhedron. *Wikipedia* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyhedron>
- [23] MAREK, Jiří. *STAVBA VÝROBNÍCH STROJŮ, druhý díl: ADITIVNÍ VÝROBA, HYBRIDNÍ VÝROBNÍ STROJE PRÁŠKOVÁ METALURGIE VSTRŽIKOVÁNÍ*. Brno, 2017. Učebný text vysokých škol. Vysoké Učení Technické v Brne.
- [24] COMPARISON AND ANALYSIS OF DIFFERENT 3D PRINTING TECHNIQUES. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 8(4.1), 9. Dostupné z: doi: <http://dx.doi.org/10.21172/1.841.44>

- [25] 3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS. *Formlabs* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>
- [26] GADET, Lucie. Comparison between 3D printing and traditional manufacturing processes for plastics. *Sculpteo* [online]. 2019 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/07/16/comparison-between-3d-printing-and-traditional-manufacturing-processes-for-plastics-3/>
- [27] *Fusion 3 Design* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.fusion3design.com/f410-3d-printer/>
- [28] *Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika: ČSN EN ISO 12100*. 01.06.2011. 2011.
- [29] About #3DBenchy: Features. *3D Benchy* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.3dbenchy.com/about/>
- [30] Zebra DS2278 Cordless 2D Barcode Scanner. *Barcode* [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://barcode.com.sg/wp-content/uploads/2019/08/Zebra-DS2278-3.jpg>
- [31] *Uznesenie Európskeho parlamentu z 3. júla 2018 o trojrozmernej tlači ako výzve v oblasti práv duševného vlastníctva a občianskoprávnej zodpovednosti (2017/2007(INI)): Trojrozmerná tlač: práva duševného vlastníctva a občianskoprávna zodpovednosť, P8\_TA(2018)0274*. In: . 2020. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018IP0274&from=EN>
- [32] IQBAL, Mary. How the 12 principles in the Agile Manifesto work in real life. *Scrum* [online]. 12.2.2022 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.scrum.org/resources/blog/how-12-principles-agile-manifesto-work-real-life>
- [33] *What is product Backlog in SCRUM* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.visual-paradigm.com/scrum/what-is-product-backlog-in-scrum/>
- [34] VÝBOHOVÁ, Petra. Návrh a výroba dílů podvozku modelu automobilu s využitím 3D FDM tisku. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 49s. 10 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [35] CHROMÝ, Adam 3D Scanning with Proximity Planar Scanner: master's thesis. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Control and Instrumentation, 2013. 81 p. Supervised by doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [36] Shining 3D EinScan-SE a EinScan-SP. *3Dwiser* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-skenery/shining-3d/shining-3d-einscan-se-a-einscan-sp/>

[37] *Ceny 3D tisku: Sharplayers* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://sharplayers.cz/3d-tisk-cena/#:~:text=Ceny%203D%20tisku%20Ka%C5%BEd%C3%BD%20v%C3%BDrobek%20je%20unik%C3%A1tn%C3%AD%2C%20mus%C3%ADme,tisku%20se%20pohybuje%20od%2050%20do%20150%20K%C4%8D>.

[38] *Numpy-stl 2.16.3* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/numpy-stl/>



## 9 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AEM	Aplikovaná elementárna metóda
DoE	Navrhovanie experimentov
FDM	Fused deposition modeling
GA	Genetický algoritmus
MKP	Metóda konečných prvkov
PLA	Polylaktidová vlákna
PETG	Polyethylene terephthalate glycol
PSO	Optimalizácia hejnom častíc
SLA	Stereolitografia
3D Tlač	trojdimenziálna tlač

