

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění,

projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ JAKO ZDROJ DAT PRO ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

VÝROBY

REVERSE ENGINEERING AS A DATA SOURCE FOR ADDITIVE

MANUFACTURING

AUTOR: Bc. STANISLAV TOMAN

STUDIJNÍ PROGRAM: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. LIBOR BERÁNEK, Ph.D.

PRAHA 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Toman Jméno: Stanislav Osobní číslo: 473416  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávající katedra/ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie  
Studijní program: Výrobní inženýrství  
Specializace: Bez specializace

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Reverzní inženýrství jako zdroj dat pro aditivní technologie výroby

Název diplomové práce anglicky:

Reverse engineering as a data source for additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Obor reverzního inženýrství, proces a aplikační potenciál
2. Metody měření využitelné pro reverzní inženýrství
3. Aditivní technologie pro zpracování polymerů, jejich dělení a základní funkční principy
4. Aplikace procesu reverzního inženýrství na vybranou součást a jeho zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: 15.03.2022

Termín odevzdání diplomové práce: 29.07.2022

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

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

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## **Anotace**

Předmětem této práce je seznámit čtenáře s procesem reverzního inženýrství. V teoretické části práce je popsán postup reverzního inženýrství, jeho historie, oblasti využití a přístroje, které se pro reverzní inženýrství používají. Také jsou zde popsány aditivní technologie, které, jak již vyplývá z názvu práce, s reverzním inženýrstvím úzce souvisí. Experimentální část práce zahrnuje aplikaci reverzního inženýrství na výrobu ergonomického cyklistického sedla za použití aditivních technologií.

## **Klíčová slova**

Reverzní inženýrství, skener, aditivní technologie, sedlo, tiskárna.

## **Annotation**

The subject of this thesis is to introduce the reader to the process of reverse engineering. The theoretical part of the work describes the process of reverse engineering, its history, areas of use and devices used for reverse engineering. Additive technologies are also described here, which, as already follows from the title of the work, are closely related to reverse engineering. The experimental part of the work includes the application of reverse engineering to the production of an ergonomic bicycle saddle using additive technologies.

## **Keywords**

Reverse engineering, scanner, additive technology, saddle, printer.

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu Ing. Liborovi Beránkovi, Ph. D. za cenné informace, a čas který mi poskytl. Dále děkuji Ing. Pavlovi Novákovi, Ph. D., který si vždy našel čas, aby mi pomohl s používaným softwarem. Děkuji také své přítelkyni a rodině za podporu při psaní této práce.

## Obsah

Seznam použitých zkratk.....	10
1 Úvod.....	11
2 Reverzní inženýrství.....	12
2.1 Historie.....	13
2.1.1 Průmyslová revoluce.....	13
2.1.2 Inspirace přírodou.....	14
2.2 Využití reverzního inženýrství.....	16
2.2.1 Letecký průmysl.....	16
2.2.2 Re v medicíně.....	17
Modifikace z hlediska ergonomie.....	19
2.2.3 Přesné sedačky ve Formuli 1.....	20
2.2.4 Footscan.....	21
2.2.5 Výroba ergonomických sedadel na kolo.....	21
2.2.6 Reverzní inženýrství softwaru.....	24
2.2.7 Vojenská špionáž.....	24
2.2.8 Průmyslová špionáž.....	24
2.2.9 Výroba náhradních dílů.....	25
2.2.10 Ochrana kulturních památek.....	25
2.2.11 Ztráta dat.....	25
2.2.12 Produkty s ukončenou výrobou.....	25
2.2.13 Aditivní výroba.....	25
3 Metody měření využitelné pro reverzní inženýrství.....	26
3.1 Kontaktní měření.....	27
3.1.1 CMM (Coordinate Measuring Machine).....	27
3.2 Bezkontaktní měření.....	28
3.2.1 Kamerové snímací systémy a RE ve 2D.....	28
3.2.2 Metody založené na principu triangulace.....	30
3.2.3 Laser scanner.....	30
3.2.4 Pruhová projekce.....	33
3.2.5 Fotogrammetrie.....	36
3.2.6 Chromatický senzor bílého světla.....	37
3.2.7 Výpočetní tomografie.....	38

3.3	Zpracování získaných dat v rámci RE .....	40
3.3.1	Křivky.....	40
3.3.2	Mračno bodů .....	40
3.3.3	Polygonizace .....	41
3.4	Parametrizace.....	42
3.4.1	Siemens NX.....	43
3.4.2	ZEISS Reverse Engineering.....	43
3.4.3	Geomagic Design X.....	44
3.4.4	GOM Inspect Pro .....	44
4	Aditivní technologie pro zpracování polymerů .....	45
4.1	Dělení 3D tiskáren a základní funkční principy .....	46
4.1.1	FDM (FFF) .....	46
4.1.2	SLA (Stereolithografie).....	49
4.1.3	SLS.....	50
4.1.4	MJF .....	51
4.1.5	Polyjet.....	51
4.2	Základní materiály pro 3D tisk metodou FFF.....	52
4.2.1	ABS.....	52
4.2.2	PLA.....	52
4.2.3	PET.....	53
4.2.4	PETG.....	53
4.2.5	TPU .....	53
5	Vlastí aplikace procesu reverzního inženýrství pro vytvoření ergonomického sedla jízdního kola .....	54
5.1	Konstrukce .....	55
5.2	Získání otisku .....	56
5.3	Skenování.....	60
5.4	Příprava dat pro aditivní výrobu.....	66
5.5	Zhodnocení modelu .....	78
5.6	Vytváření odlehčené struktury .....	79
5.6.2	Výběr varianty k tisku .....	94
5.6.3	Příprava kódu pro tiskárnu Stratasys.....	95
5.6.4	Příprava kódu pro tiskárny Průša .....	99
5.7	Hodnocení prvních výtisků.....	104



5.8	Výroba modelu s odlehčenou strukturou uvnitř sedla .....	106
6	Závěr .....	111
7	Citovaná literatura.....	113
8	Seznam obrázků .....	119
9	Seznam tabulek .....	122

## Seznam použitých zkratk

RE	Reverse engineering	Reverzní inženýrství
TPU	Thermoplastic polyurethan	Termoplastický polyurethan
CMM	Coordinate Measuring Machine	Souřadnicový měřicí stroj
FDM	Fused Deposition Modeling	
FFF	Fused Filament Fabrication	
SLA	Stereolithography	Stereolithografie
SLS	Selective Laser Sintering	
MJF	Multi Jet Fusing	
PJ	Poly Jet	
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene	Akrylonitrilbutadienstyren
PLA	Polylactic acid	Kyselina polyléčná
PET	Polyethylene terephthalate	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylene terephthalate glycol	Polyethylentereftalát Glykol

# 1 Úvod

Reverzní inženýrství, jak už sám název napovídá, je zpětný postup výroby předmětů. Zpětný v tom smyslu, že samotný proces nezačíná tvorbou výkresu nebo jiných dat pro výrobu součásti, ale objektem samotným. Při tomto procesu se tedy data pro výrobu získávají přímo z reálné součásti.

Teoretická část práce popisuje samotný proces reverzního inženýrství. V první části se lze dočíst o jeho historii, vzniku a vývoji. Další část se zabývá jeho využitím, jako je například v leteckém průmyslu, medicíně nebo, stejně jako bude využito v praktické části práce, k výrobě ergonomických produktů. Dále jsou zde popsány metody, přístroje a programy, kterými je možné získat a zpracovat data, pomocí kterých lze vyrobit nebo modifikovat požadovaný díl. Poslední kapitola teoretické části je věnována aditivní výrobě. Jsou zde popsány základní principy 3D tisku, typy 3D tiskáren a nejpoužívanější materiály pro 3D tisk.

V praktické části je popsán a ukázán proces výroby ergonomického cyklistického sedla po vzoru zavedených značek. Vstupními daty byl otisk z modelíny, který byl následně naskenován. Získaný sken byl upraven tak, aby bylo možné vyrobit sedlo na míru. Toto sedlo se vyrábělo pomocí 3D tisku na FDM tiskárně.

## 2 Reverzní inženýrství

Inženýrství ve strojírenství jako takové je proces navrhování, výroby a montáže nejrůznějších výrobků, dílů a komponent. Inženýrství se dělí na dvě skupiny. Tou první je klasické – dopředné a druhou je reverzní – zpětné. Klasické inženýrství je tradičním postupem, kdy životní cyklus výrobku začíná průzkumem trhu, následuje návrh, konstrukce a vznik výkresové dokumentace, výroba, používání a nakonec likvidace. V některých případech, zejména u starých nebo poškozených součástí, výkresová dokumentace a modely chybí. Právě u těchto dílů se dostává ke slovu zpětné – reverzní inženýrství (RE). Při tomto procesu jsou potřebná data získávána z konkrétních fyzických dílů nebo jejich částí. Tyto předměty je třeba zdigitalizovat, získat mrak bodů nebo jiné informace o rozměrech a vlastnostech výrobku a ty následně převést na CAD model či je použít pro tvorbu výkresu. Cílem reverzního inženýrství je také odkrýt princip a fungování zkoumaného předmětu a případné vytvoření kopie, která má stejné nebo podobné vlastnosti. [1]

Postup a práce s daty budou podrobněji popsány v kapitole 3.3, ale pro vhodnou kontinuitu práce je zjednodušeně popsán i zde.

Mrak bodů vyžaduje další úpravu. První je filtrování bodů a polygonizace, což je vytvoření trojúhelníkové sítě. Další krok je parametrizace, kdy se ze sítě vytvoří parametrické části modelů, jako kdyby model vznikl v CAD programu. Schéma postupu reverzního inženýrství lze vidět na Obrázek 1. [1]



Obrázek 1: Postup Reverzního inženýrství

Hlavní výhodou reverzního inženýrství je zkrácení vývojového cyklu výrobku, čímž dojde k razantní úspoře nákladů na vývoj dané součásti. Pro příklad lze uvést kopírování evropských automobilů, kdy v Evropě trvá zavedení výroby produktu i více než 10 let a jinde na světě trvá okopírování výrobní haly i samotného výrobku podstatně kratší dobu.

Data jsou obvykle z objektu získána ve formě mraku bodů. Tento mrak může být získán i z nekompletního nebo poškozeného dílu, který může být následně domodelován. Toto má vysoké využití v restaurování starých strojů, například motocyklů či automobilů. [1]

Vhodným příkladem pro demonstraci využití reverzního inženýrství je také zavádění nebo navrhování nových komponent pro nejrůznější zařízení. Designéři často vytvářejí své nápady ze sádry, dřeva, nebo hlíny a následně je skenují a vytvářejí virtuální 3D modely. Tento přístup značně šetří při vývoji peníze a čas, protože není nutné vyrábět drahé prototypy. Virtuální modely získané reverzním inženýrstvím se používají pro počítačové simulace. [1]

## 2.1 Historie

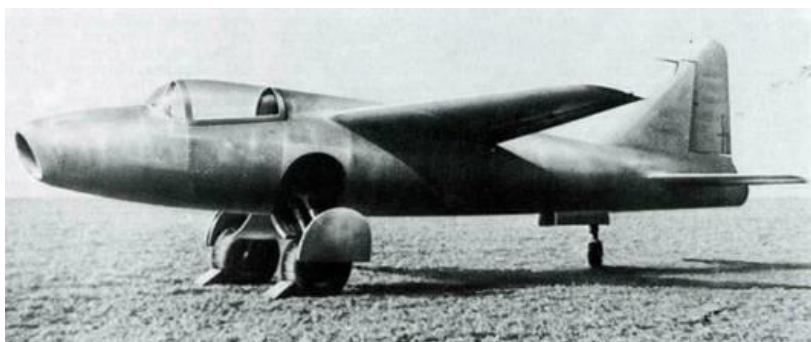
### 2.1.1 Průmyslová revoluce

Vliv RE na dnešní podobu průmyslu je větší, než by se na první pohled mohlo zdát. RE zahrnuje daleko víc, než pouze zavádění levnějších výrobků a kopírování konkurence. RE má veliký vliv na rychlost vyvíjení a zavádění nových výrobků. Toto se dá pozorovat na příkladu obyčejné žárovky pro pouliční lampy, kterou lze vidět na Obrázek 2. Její vynalezení trvalo několik desítek let a její životní cyklus byl krátký. Její další úpravy následně trvaly jen několik roků. Dalším příkladem je fotoaparát, kde uplynulo několik let mezi představením digitálního fotoaparátu a výrobou zrcadlovek, které se vyrovnají kamerám. RE je tedy klíčem k rychlému průmyslovému rozvoji, protože RE poskytuje technologicky vyspělé a efektivní prostředky k „znovuobjevování“ moderních strojů a přístrojů pro budoucí průmysl. [1]



Obrázek 2: Oblouková lampa [2]

Velikou úlohu sehrálo reverzní inženýrství v leteckém průmyslu, a to zejména v polovině 20. století, kdy zaznamenaly, ač vinou Druhé světové války, veliký pokrok letecké proudové motory, které před válkou neexistovaly a několik let po ní se staly naprosto nezastupitelným zařízením, která posunula dopravu o několik kroků dále. První proudové letadlo Heinkel He 178 je na Obrázek 3. Od této doby se v letectví žádný radikální pokrok nestal. Další pohled na rozvoj letectví můžeme pozorovat v řízení leteckých provozů, do kterého se dostává spousta nových hardwarových a softwarových komponent a nejrůznější elektroniky. [1]



Obrázek 3: První proudové letadlo He 178 [3]

To vše má za účel především zvýšení bezpečnosti, tam kde je potřeba hodně nových certifikovaných dílů a nejlépe za nejnižší možnou cenu, což je prostředí, kde má reverzní inženýrství má velký prostor pro své uplatnění. [1]

### 2.1.2 Inspirace přírodou

Člověk se od nepaměti inspihuje přírodou. Může se jednat o pouhé vojenské hnědozelené zbarvení, suchý zip, který je vytvořený podle květů bodláků nebo

hydrodynamické tvary lodí okopírované z tvaru těla ryb. Již podruhé je třeba vzít si za příklad letecký průmysl a konkrétně sestavení prvního letounu bratří Wrightů. Tvar křídel tohoto letadla je téměř totožný s tvarem křídel racků. Představu o podobnosti křídel letadla a racků je možné si udělat na základě Obrázek 4 a Obrázek 5. [1]



Obrázek 4: Rackové, jejichž křídla se stala inspirací pro křídla letadel [1]



Obrázek 5: První letadlo [1]

Toto letadlo vzlétlo poprvé v roce 1903, kdy urazilo vzdálenost přibližně 260 metrů ve výšce několika desítek metrů. Dnešní dopravní a nákladní proudová letadla létají v deseti kilometrech a dá se říci, že během jednoho letu obletí téměř celý svět.

Přírodou se letečtí inženýři inspirovali dodnes. Nicméně si mohou jen přát, aby dokázali sestavit letadlo tak obratné jako je noční můra či netopýr, který se dokáže za letu otočit o 180° na poloměru menším, než je rozpětí jeho křídel. Jako vzor jim také posloužil nejrychlejší tvor na planetě – sokol stěhovavý. Podle tvaru jeho křídel byly vyvinuty nadzvukové stíhačky. [1]

## 2.2 Využití reverzního inženýrství

Reverzní inženýrství zaznamenalo velký pokrok zejména v posledních několika desítkách let. Jako příklad poslouží to, že vrcholem RE v 70. letech bylo okopírování lopatky turbodmychadla, což je dnes celkem běžná praxe. Velký posun zaznamenalo RE s vynalezením nových skenerů. Největší rozkvět však zažilo, když se na něj přestalo hledět jako na okrádání konkurence, ale začalo být vnímáno jako pevná součást technické praxe.

### 2.2.1 Letecký průmysl

Na fakt, že se dnes na reverzní inženýrství nehledí pouze jako na negativní záležitost, ale jako na vítaný soubor prostředků má asi největší vliv letecký průmysl. Tento pozitivní pohled na věc se anglicky nazývá Positive Mental Attitude (PMA) a vznikl a praktikuje se v USA. Každý díl, u kterého se předpokládá použití reverzního inženýrství, je opatřen certifikátem, který vydává certifikační úřad. Tento přístup začala razit Federální letecká správa (FAA – Federal Aviation Administration). Vydávání certifikátů a celý tento systém se postupně vyvíjí ruku v ruce s pokrokem RE. [1] [4]

Velmi často popisovaným příkladem užití RE je porovnání letadel Tupolev TU – 4 na Obrázek 6 a bombardéru B-29 na Obrázek 7. Během bojů Druhé světové války, kdy probíhaly nálety amerických bombardérů na Japonsko, musely tři letadla B-29 nouzově přistát v Sovětském svazu. Sovětský bombardér TU-4 a americkou B-29 lze od sebe rozlišit na první pohled velmi těžko a laik by si mohl myslet, že se jedná o dvě stejná letadla. [4]





Obrázek 6: Tupolev TU - 4 [5]



Obrázek 7: B29 [6]

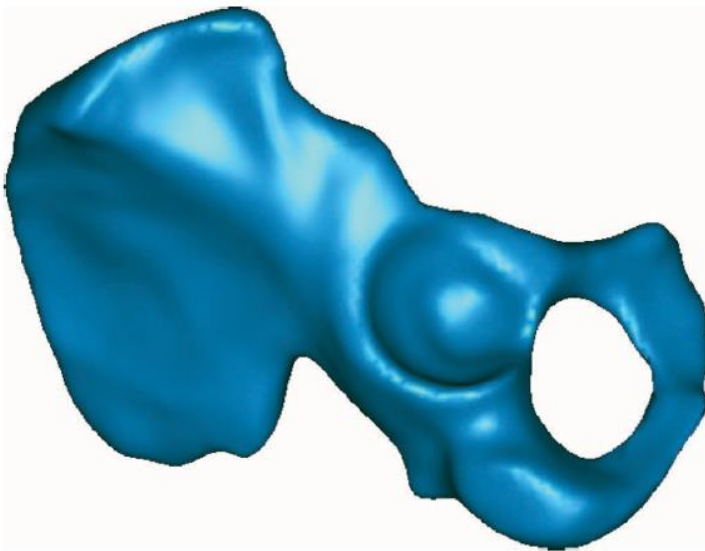
Toto není jediný případ užití RE mezi USA a Sovětským svazem. Americká stíhačka F-86 byla zkonstruována po modifikaci Sovětského MiGu-15, který byl používán během druhé světové války. [4]

### 2.2.2 Re v medicíně

Jak již bylo popsáno, reverzní inženýrství má široké spektrum využití a společně s použitím aditivních technologií představuje nástroj pro výrobu prakticky čehokoliv. V průmyslu je jeho použití již samozřejmostí, ale člověk ho opravdu docení až když se přímo týká jeho samého. Příkladem toho je jistě použití v medicíně, kde je třeba vyrábět výrobky přímo určené pro konkrétní osobu s vysokou přesností.

Velkou úlohu hraje RE při léčbě po těžkých úrazech, kdy je nevratně zničena část nebo celá kost. V tomto případě se naskytuje možnost naskenování zbytku kosti a domodelování chybějící části, která se následně vytiskne z materiálu, který lidské tělo přijme. Druhá a jednodušší možnost je využití při úrazech kostí nebo kosterních částí, které jsou párové. V tomto případě obvykle stačí naskenovat zdravou část, zrcadlově ji překlopit a „pouze“ vymodelovat dosedací plochy implantátu a zničené kosti.

Modely také slouží lékařům jako vizualizace zranění pro přípravu operace a diagnostiku. Jeden takový model lze vidět na Obrázek 8. [7]

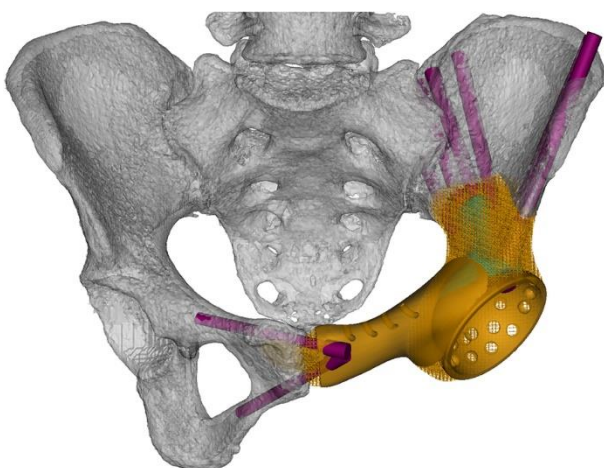


*Obrázek 8: Model části pánve [7]*

Data se v medicíně získávají podobně jako v běžném průmyslu. Nejčastěji se pro získání dat využívá rentgen a magnetická rezonance. Obvyklé je také použití laserového skenování. Vše obvykle záleží na situaci a podmínkách. Přesnost skenování se pohybuje v rozsahu  $\pm 0,1\text{mm}$ . Model náhrady kyčle a hlavice kyčelního kloubu lze vidět na Obrázek 9 a Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. [7] [8]



Obrázek 9: Hlavice kyčelního kloubu [8]



Obrázek 10: Model náhrady kyčle [8]

Dalším medicínským využitím RE je při výrobě protéz. Sériově vyráběné protézy většinou přesně nesedí a jsou nepohodlné. S využitím RE lze snad vyrobit na míru dělanou protézu a s použitím aditivních technologií značně zkrátit dobu její výroby. [9]

### **Modifikace z hlediska ergonomie**

Předměty hromadné výroby se svou konstrukcí, tvary, materiály a barvou snaží obsáhnout co největší počet potencionálních uživatelů. To ale znamená, že výrobky jsou stoprocentně padnoucí a vhodné jen pro malou část koncových zákazníků. Tento fakt nahrává tomu, že vznikají ergonomicky přesné výrobky,

kteře jsou na míru udělané pro jednoho konkrétního člověka. Proces výroby takovýchto věcí obvykle spočívá v naskenování určitých částí těla nebo jeho částí. Obvykle se dělají například odlitky, které slouží jako model části lidského těla. Tento postup je podobný, ba až stejný jako postup Reverzního inženýrství.

### 2.2.3 Přesné sedačky ve Formuli 1

Krásný příklad ergonomicky optimalizovaného dílu, kde je využito reverzní inženýrství lze nalézt ve „výstavní skříni techniky“ ve Formuli 1. Aby pilot vydržel dlouhé hodiny ve voze, kde na něj neustále působí velké síly a přetížení, potřebuje pro něj na míru vyrobenou sedačku, která zaručí pohodlí i v těchto extrémních podmínkách. [10]

Ještě v továrně, obvykle před předsezónním testováním, usedne jezdec do podvozku vozu oblečený do kombinézy, rukavic, závodních bot a helmy. Vše je napodobeno stejně, tak jako bude pilot sedět ve voze během jakéhokoli závodu. Záda pilota jsou „naskenována“ tak, že si jezdec sedne do podvozku vozu vyloženého speciální pěnou (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.), do které se obtiskne. Vzniklý tvar se následně naskenuje a získá se 3D model jezdce v poloze, ve které bude řídit vůz. Tento model pak slouží k výrobě karbonové sedačky [10]



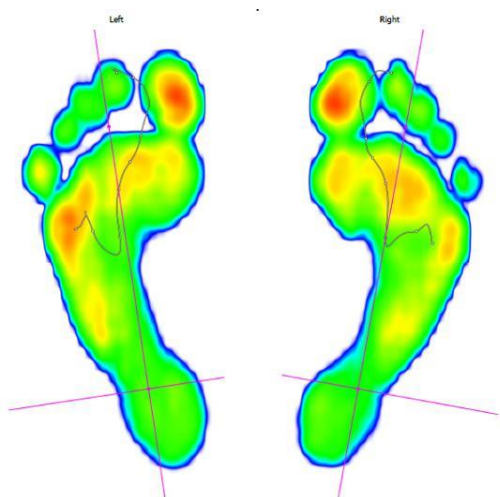
Obrázek 11: Pilot v šasi F1 během obtiskávání zad do pěny [11]

### 2.2.4 Footscan

V dnešní době se lidé snaží hodně sportovat a ke sportování patří i kvalitní sportovní vybavení a každý hledí na to, aby měl právě to nejsprávnější a jemu

nejpohodlnější. K tomuto účelu existuje přístroj zvaný Footscan, který slouží ke skenování lidského chodidla při běhu a pomáhá s výběrem nebo výrobou správných, ergonomických bot. Zařízení lze nalézt jen ve vybraných až prémiových obchodech a je lehce přehlédnutelné. [12]

Celý přístroj má tvar desky, na které jsou přiděleny tisíce vysoce citlivých senzorů tlaku, jejich hustota pak vychází na 2,6 senzoru na  $\text{cm}^2$ . Rozsah těchto senzorů je  $0\text{--}200\text{ N/cm}^2$ . Tyto senzory pak rozeberou lidský běh doslova na milisekundy, protože jejich snímací frekvence je 125 Hz. Provádí se totiž statické a dynamické měření došlapu. Naměřená data se ihned vyhodnocují pomocí specializovaného softwaru, kde lze vidět barevné rozložení tlaků při došlapu. Výstup ve formě barevné mapy, kde jednotlivé barvy znázorňují hodnotu tlaku lze vidět na Obrázek 12. [12] [13]



Obrázek 12: Výstup ze scanneru Footscan [13]

### 2.2.5 Výroba ergonomických sedadel na kolo

V neposlední řadě je třeba uvést využití, ke kterému směřuje i tato práce. Tím je výroba ergonomických a customizovaných sedel na jízdní kola. Cyklistika je celosvětový fenomén, který prochází stejně jako jiná odvětví průmyslu vývojem. Tento vývoj se týká i cyklistických ergonomických sedadel. Výrobu takového sedla pomocí aditivních technologií si klade za cíl i tato práce. Jako inspirace slouží již zavedené výrobky firem Specialized a Fizik, ale také český start up Posedla.

### 2.2.5.1 Posedla

Posedla je český start up, který má za cíl vyrábět cyklistická sedla individuálně pro každého jezdce pomocí 3D tisku. Celý proces začíná tím, že cyklista obdrží dotazník o jízdním stylu a domácí testovací sadu, pomocí které změří šířku své sedací kosti a rozložení tlaku při posedu na kole. Získaná data jsou následně zpracována pomocí softwaru Grasshopper, který je spojen s modelovacím softwarem Rhino. V tomto programu je vytvořen individuální tvar svrchní části každého sedla. [14]

Jako materiál měkké části je používán termoplastický polyuretan (TPU). Výroba svrchní části sedla probíhá 3D tiskem metodou Multi Jet Fusing (MJF), kdy je prášek spojován lepidlem, které je následně vytvrzováno světlem. Zavedené značky jako Specialized a Fizik používají metodu SLS. Tyto metody budou popsány dále. Díky 3D tisku je možné vytvořit odlehčenou strukturu, která by jiným způsobem vyrobit nešla. Tato struktura je lehká, optimálně pružná a dokáže tlumit nárazy. [14]

Vytištěná stélka je následně nalepena na jeden ze šesti sériových karbonových skeletů. Ty se liší zejména šířkou a tvarem a ohnutím bočnic. Skelety jsou spojeny s kolejnicemi, které zajišťují spojení mezi sedadlem a sedlovou tyčí. Kolejnice jsou u běžných sedadel z ocelového drátu, ale na těchto customizovaných sedadlech jsou stejně jako skelet z karbonu. Hmotnost skeletu s kolejnicemi je okolo 95 gramů. Celé sedlo lze vidět na Obrázek 13. [14]  
[15]





Obrázek 13: Sedadlo projektu Posedla [14]

### 2.2.5.2 Specialized Mirror

Specialized je prémiovou značkou v cyklistickém průmyslu a neustále se snaží posouvat hranice u cyklistických výrobků. Proto není překvapením, že právě Specialized přišel jako první velká cyklistická firma s 3D tištěným sedlem, které lze vidět na Obrázek 14. Na rozdíl od výše zmíněného projektu, Specialized usiluje o sériovou výrobu, a proto nedělá sedlo pro každého zákazníka zvlášť. To se děje jen u závodníků. Sedla Specialized Mirror jsou k dostání ve dvou šířkách – 143 a 155 mm. Filozofie je však taková, že sedlo se přizpůsobí samo každému cyklistovi díky své konstrukci. Stélka se skládá z přibližně 14 000 vzpěr a 8 000 uzlů. Hustota struktury se mění v závislosti na poloze na sedle (na špičce není potřeba taková opora jako na sedací části).

Svrchní část je vyrobena metodou DLS a následně lepeno na skelet s kolejnicemi. [16]



Obrázek 14: 3D tištěné sedlo Specialized [16]

Ve své praktické části bych si rád vyzkoušel proces návrhu a výroby podobného cyklistického sedla. Důvodů, proč jsem si vybral právě sedlo je několik. Prvním z nich je, že mám rád cyklistiku a technika okolo kol mě baví. Dalším důvodem je, že si myslím, že 3D tištěná sedla nejsou tak rozšířená a že mají budoucnost

### 2.2.6 Reverzní inženýrství softwaru

Reverzní inženýrství nenachází uplatnění jen ve strojírenství, ale i v oblasti softwaru. Informace o návrhu softwaru se mohou v průběhu času ztratit, reverzní inženýrství může obnovit ztracené informace a zkrátit čas na pochopení zdrojového kódu. I když byly funkční staré části počítačového vybavení ztraceny, reverzní inženýrství umožňuje technikům znovu objevit tyto vzorce a aktualizovat je. [1]

### 2.2.7 Vojenská špionáž

Reverzní inženýrství má ve vojenském průmyslu nezastupitelnou roli. Všechny armády světa musí „konkurenci“ bedlivě sledovat, protože zde nejde jen o finanční ztráty, ale i katastrofy se ztrátami životů. Konkurenční výrobky se napodobují nejčastěji díky fotografiím. [1]

### 2.2.8 Průmyslová špionáž

Každého nejdříve asi napadne, že nejčastější využití RE je v průmyslové špionáži a ano, toto je jasný příklad RE. Tento trend lze dobře pozorovat



například na čínských automobilech. Výrobci se tak zpětně snaží přijít na to, jak funguje daný konkurenční produkt nebo řešení. [1]

### 2.2.9 Výroba náhradních dílů

Pokud původní výrobce zařízení ztratil konstrukční data produktu, nebo tato data již neexistují, lze použít reverzní inženýrství k analýze důležitých informací o produktu, které pomohou při jeho opětovné výrobě. [1] [17]

### 2.2.10 Ochrana kulturních památek

Muzejní kusy a historické artefakty lze zachytit pomocí 3D skenování a použít zpětné inženýrství k uložení CAD dat pro případ jakéhokoli budoucího poškození objektu či v případě provádění různých analýz. [1] [17]

### 2.2.11 Ztráta dat

Reverzní inženýrství se často používá, když nelze dohledat data k rozběhnutému projektu a není ani žádná fyzická osoba, která se ztracenými daty pracovala. Celý systém je potřeba zpětně přepracovat a jako nejlepší nástroj pro znovuvytvoření ztracených dat je reverzní inženýrství. [1] [17]

### 2.2.12 Produkty s ukončenou výrobou

Pokud je třeba znovu vyrobít věc, ke které už neexistuje výkresová dokumentace, reverzní inženýrství může společně s pomocí získat ztracené návrhy a znovu vytvořit proces výroby dlouho nevyráběné součásti. [17]

### 2.2.13 Aditivní výroba

Aditivní výroba představuje nástroj pro vyrobení téměř jakéhokoliv tvaru. Dá se zde také využít řada optimalizací (topologická, lattice..). Tyto optimalizované díly jsou ale běžnými technologiemi obvykle těžko vyrobitelné. Reverzní inženýrství nalézá využití, když je třeba použít starý díl, kterému chceme ponechat funkční vlastnosti, ale například snížit hmotnost. V takovýchto případech jde reverzní inženýrství a aditivní výroba skvěle dohromady.

## 3 Metody měření využitelné pro reverzní inženýrství

Když se podnik nebo osoba rozhodne, že chce začít s reverzním inženýrstvím nějakého výrobku, obvykle si daný výrobek pořídí a rozebere ho, aby zjistila jeho vnitřní mechanismy. Tímto způsobem mohou inženýři odhalit informace o původním designu a konstrukci produktu. [18]

Při zpětném inženýrství se obvykle začíná analýzou rozměrů a vlastností daného produktu, ať už jde o letadlo, loď, vozidlo, počítač nebo část průmyslového stroje. Během této analýzy se provádí měření rozměrů funkčních částí výrobku. [18]

Dnes se k provádění těchto druhů měření většinou používají technologie 3D skenování. Pro vysoce přesné aplikace stále nelze nahradit dotykové snímací systémy. Pomocí trojrozměrných skenerů lze získat přesné údaje o výrobcích a také je možné tyto informace automaticky zaznamenávat do databází. [18] [19]

Snímací systémy se obecně dělí na kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní se dále dělí na spínací a skenovací. Bezkontaktní systémy jsou členitější a jejich dělení spočívá v principu, na kterém pracují. První skupinou jsou metody, které pracují na principu triangulace, který je popsán níže. Mezi tyto se řadí Laser scanner, pruhová projekce a fotogrammetrie. Dalšími zástupci bezkontaktních senzorů jsou kamerové systémy, chromatický senzor bílého světla a výpočetní tomografie. [18] [19]

Jejich použití záleží na výrobku, na kterém chceme proces reverzního inženýrství aplikovat a požadavcích na přesnost, které jsou na proces kladeny. O použití jednotlivých metod a přístrojů bude hovořit následující část této práce. Jejich výstupem jsou mraky (soubory) bodů nebo 2D řezy. [18] [19]

Je také nutné uvést, že objekt nemusí být vždy skenován 3D skenerem. Záleží vždy na tvaru výrobku. Například pro skenování různých desek, plechových

výrobků, ve kterých se nacházejí pouze otvory jednodušších tvarů a výlisků je vhodnější využít pouze mikroskop nebo kameru, pomocí nichž stačí pouze zjistit hodnoty rádiusů zkosení apod. a celý díl pak lze jednoduše vymodelovat. [18] [19]

## 3.1 Kontaktní měření

### 3.1.1 CMM (Coordinate Measuring Machine)

CMM je stacionární zařízení, jehož měření je realizováno v kartézském souřadném systému. Stroj snímá polohu každého bodu v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , přičemž v každé ose má vlastní pohon a pro zjištění polohy bodu je potřeba velmi přesné odečítání vzdáleností v jednotlivých osách. Aby byl stroj co možná nejpřesnější, je kladen důraz na nízkou hmotnost, rozměrovou stabilitu, schopnost tlumení vibrací a nízký koeficient teplotní roztažnosti. [20]

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje přesnost měření na CMM je konstrukce, ke které je upnuta měřicí hlava. Ta může být například most, portál nebo rameno. Obecně platí, že čím více obsahuje stroj kloubů a pohyblivých částí, tím méně přesný je. Z tohoto důvodu patří mezi nejméně přesné konstrukce, kdy je měřicí hlava umístěna na pohyblivém rameni. Příklad kartézského souřadnicového měřicího stroje lze vidět na Obrázek 15. [20]

Souřadnicové měřicí stroje jsou zařízení, která fungují na principu snímání (extrakce) bodů z konkrétní součásti umístěné v pracovním prostoru tohoto stroje. Následně dochází k porovnání tvaru vzniklého z extrahovaných bodů s požadovaným tvarem předepsaným na výkresové dokumentaci a vyhodnocení veškerých potřebných metrologických informací jako jsou rozměry, tvary, polohy a orientace. [20]



Obrázek 15: Souřadnicový měřicí stroj [21]

## 3.2 Bezkontaktní měření

Bezkontaktní zařízení jsou obvykle založena na nějaké formě měření světla, ačkoli například pro lékařské aplikace se běžně používá ultrazvuk, rentgenové záření a magnetická rezonance. V současné době jsou k dispozici bezkontaktní zařízení, která lze namontovat na hlavici souřadnicových měřicích strojů, a tím zajistit větší flexibilitu při měření objektů, které by se mohly při použití kontaktního měření vychýlit. Bezkontaktní zařízení však mohou být i samostatné. [1] [19]

### 3.2.1 Kamerové snímací systémy a RE ve 2D

Kamerové snímací systémy se používají v situacích, kdy není nutné a ani vhodné používat 3D skenování celé součásti za účelem získání 3D modelu.

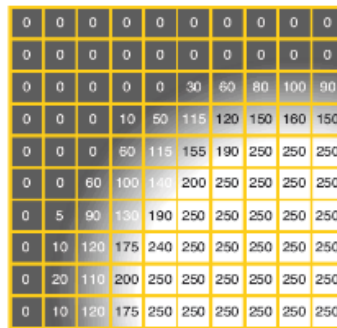
Principem je snímání světla kamerovým snímačem s CCD čipem a následné vyhodnocení obrazu nejčastěji na základě dosažení kontrastu v obraze.

Na začátku vyhodnocování senzorika registruje originální obraz ve stupních šedi, jednotlivé pixely tohoto obrazu jsou následovně převedeny na digitální amplitudy a vzniká tak digitální obraz, z něhož je následovně vytvořen pixelový obrys kontury přes operátor pro prahové hodnoty. V dalším kroku se pro každý bod pixelového obrysu interpolací určí ze sousedních hodnot tzv. subpixelový bod. Tyto body pak tvoří subpixelový obrys, ze kterého se poté vhodnou metodou vypočítá vyrovnávací prvek, který se poté vyobrazí v originálním

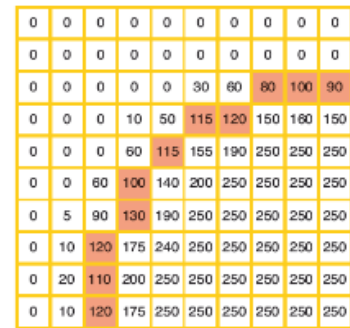
obrazu pro vizuální kontrolu. Při tomto procesu je každému pixelu přiřazen jeden měřený bod, tyto body se pak řadí za sebe. Tím je možno při vyhodnocování odhalit rušivé vlivy při měření a odfiltrvat tak data ovlivněná těmito vlivy, aniž by došlo ke změně tvaru kontury. Rozlišení, popřípadě nejistota měření je přímo závislá na vzdálenosti a velikosti pixelů. Celý postup pak vidět na Obrázek 16. [19]



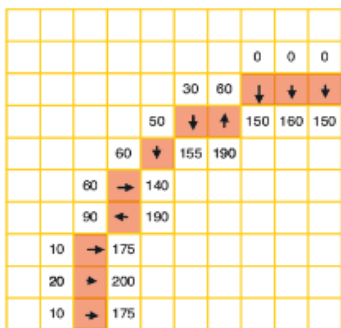
a) Originální obraz



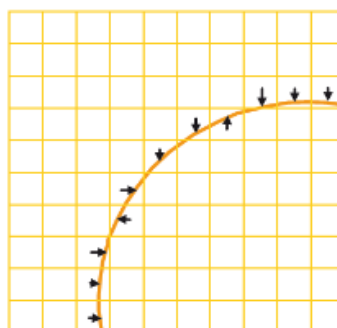
b) Digitální obraz



c) Pixelový obrys



d) Subpixelový obrys



e) Vyrovňovací prvek



f) Vyrovňovací prvek v originál. obraze

Obrázek 16: Postup zpracování dat při snímání kamerou [19]

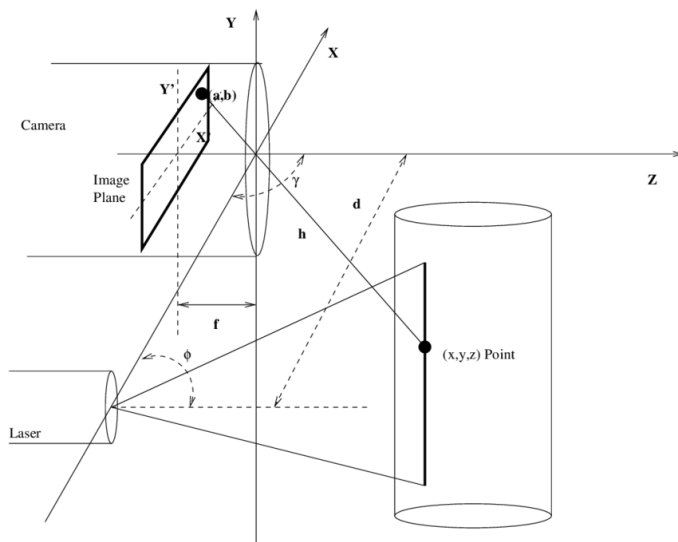
2D obrazy zaznamenané kamerovými snímači jsou vhodné především pro vyhodnocování profilů a kontur objektu. Objektivy kamerových systémů umožňují měřit i třetí souřadnici pomocí tzv. autofokusu. Nicméně aby byla přesnost ve třetí souřadnici dostačující, tak musí mít kamerový systém dostatečně malou hloubku ostrosti, která je přímo provázaná se zvětšením.

Výstupem z kamerových snímacích systémů jsou křivky, přímky, kružnice atd., které nesou informaci o tvaru objektu. Pomocí těchto informací lze tedy jednoduše vytvořit výkres nebo součást vymodelovat. [20] [19]

### 3.2.2 Metody založené na principu triangulace

Následující tři mají společný princip fungování. Základním principem těchto metod je triangulace (Obrázek 17). Při této metodě se světelný bod nebo světelná linie o vysoké intenzitě, nejčastěji z laseru, vychýlí pomocí otočného zrcadla na povrch objektu. Odražené světlo je zachycováno objektivem. Poloha měřeného bodu je následně dopočítána prostou trigonometrií.

Detailněji to lze vysvětlit třeba tak, že z polovodičového laseru je vysílán světelný paprsek, který vytváří na cílovém objektu světelný bod. Světlo, které se od snímaného povrchu odráží pak dopadá na vstupní čočku optického přijímače pod určitým úhlem, který závisí na vzdálenosti cílového předmětu od čela snímače. Úhel dopadu světla na čočku pak záleží na vzdálenosti snímaného povrchu od senzoru. Vyhodnocení se pak provádí na CCD senzoru, který pracuje, stejně jako jiné světločivné součástky, na principu fotoefektu. [22] [1] [23]



Obrázek 17: Schéma triangulace [22]

Omezení v použití této metody spočívá v tom, že plocha CCD senzoru je omezená, a proto každé měřidlo pracuje v určitém intervalu vzdáleností, kdy odražený paprsek dopadá na plochu senzoru. [1] [23]

### 3.2.3 Laser scanner

Prvním typem senzoru, který je založen na principu triangulace je 3D laserový skener (Obrázek 18). Laserové skenování kombinuje dvě sady informací a

vytváří mračno bodů z povrchu objektu. Těmito informacemi jsou data z laseru, kterým se na objekt svítí a data z jiného snímače. Obvykle se jedná o pohyblivou kameru, nebo dvě kamery pevné. Software pro 3D skenování tyto sady dat spojí dohromady pomocí známé vzdálenosti mezi polohou kamery a zdrojem laseru a vytvoří body modelu. Sestavení 3D geometrie z laserového skenování vyžaduje detekci místa, kam dopadá laserová linie na snímcích zachycených kamerou během skenování. Laserová linie je obvykle nejjasnějším místem obrazu, ale někdy mohou být zachyceny i jiné zdroje světla. Stacionární skener dokáže odlišit laserovou čáru od všeho ostatního tím, že laser cyklicky zapíná a vypíná, čímž vytváří sledovatelný rozdíl mezi laserovou čarou a ostatními světly zachycenými během skenování. [24]



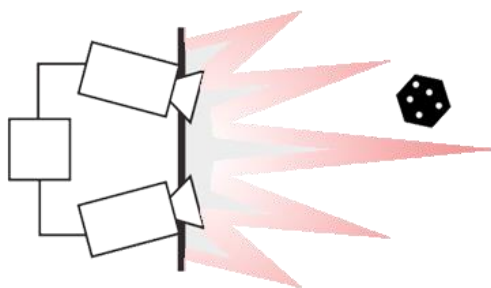
Obrázek 18: Laser scanner [24]

Laser scanner nabízí několik možností použití. První variantou je ruční použití, které se hodí pro velké objekty. Další možností je uchycení scanneru na pohyblivé rameno, které lze naprogramovat. Tato varianta je vhodná pro rychlé skenování menších objektů, kdy maximální velikost skenovaných předmětů záleží na pracovním prostoru ramena. Poslední možností je kombinace s CMM, kdy lze skenovat části objektů, do kterých se nedostane měřící sonda a následně skládat data z obou metod skenování. [24]

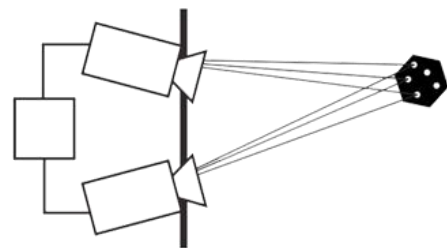
Během 3D skenování jsou zachyceny tisíce jednotlivých bodů. Stejně jako běžná kamera, může laserový skener zachytit pouze to, co se nachází v jeho zorném poli. Zachycené body zaznamenávají vše od detailů povrchu a textury až po barvu a vytvářejí přímou reprezentaci skenovaného objektu. Zachycené mračno bodů není celistvým digitálním objektem, dokud se jeho body nespojí do sítí. [25]

Pro sledování skeneru samotného v prostoru se používá metoda zvaná Optické trackování. Optické trackování je 3D měřicí technologie založená na sledování definovaného měřicího prostoru pomocí dvou nebo více kamer, jak je vidět na Obrázek 19. Každá kamera je vybavena infračerveným (IR) filtrem před objektivem a prstencem IR LED diod kolem objektivu, které periodicky osvětlují snímáný prostor IR světlem. Toto světlo není pro lidské oko viditelné a jeho intenzita je pro člověka zcela bezpečná. Objekty, které je třeba sledovat, jsou vybaveny reflexními značkami, které odrážejí přicházející IR světlo zpět do kamer. IR odrazy jsou detekovány kamerami a poté interně zpracovány optickým sledovacím systémem. Tento systém vypočítá polohu 2D značky v obrazových souřadnicích s vysokou přesností. Protože je objekt sledován více kamerami, je možné dopočítat 3D obraz. [26] [19]

Optické trackování se používá pro měření velkých svařenců, kdy není možné použít jiný souřadnicový stroj. [26] [19]



**The object is lit using near IR light**



**Retro-reflective markers reflect back**

*Obrázek 19: Schéma optického trackování [26]*

Příkladem zařízení pro laserové skenování je modulární systém ZEISS T – SCAN. Celý systém tvoří dvě komponenty. První je ruční laserový skener T-SCAN a druhým tracker T – point, který slouží pro sledování skeneru v prostoru.



Optické skenery T-TRACK je možné použít ve dvou variantách, přičemž T-TRACK 10 měří objemy do 10 m<sup>3</sup> a T-TRACK 20 do 20 m<sup>3</sup>. [27]



Obrázek 20: Laserový scanner T - Scan [27]

### 3.2.4 Pruhová projekce

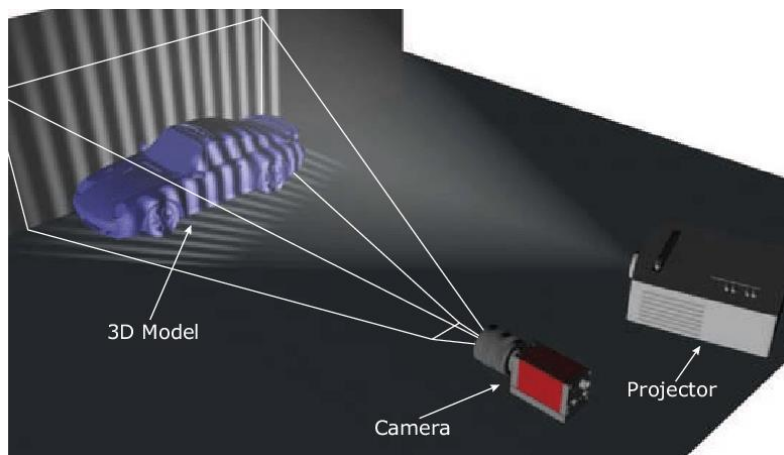
Princip měření je opět, podobně jako u laser scanneru, založen na triangulaci. Metody se však liší v tom, že na rozdíl od laser scanningu není potřeba jedním pruhem laserového světla postupně a někdy zdlouhavě osvětlit a skenovat celou součást, u proužkové projekce se naskenuje celá komponenta pouze v několika polohách, které závisí na složitosti dílu. Pruhy se obvykle promítají pod úhlem 30° a snímají se kamerou, která je k povrchu kolmá. Vše lze vidět na Obrázek 21.

Metoda spočívá v tom, že na povrch snímané součásti se promítne pruhová síť, která se snímá prostřednictvím jedné nebo dvou vzájemně posunutých kamer. Jednotlivé body ze snímaného povrchu se získají, jak již bylo uvedeno, pomocí triangulace. Pro zkvalitnění skenování je vhodné použít i více než jeden vzor proužků.

Pro zjednodušení a zefektivnění procesu je možné využít i polepení povrchu dílu speciálními značkami. Pomocí těchto značek lze přesněji zaznamenat vzdálenost a polohu kamer a tím zvýšit kvalitu výsledného modelu.

Při používání proužkové projekce nebo i jednoduššího laser scanneru je potřeba dbát na to, aby povrch předmětu nebyl lesklý, protože laserové světlo by se odrazilo a měření by nebylo přesné. Kamera totiž snímá laserovou linii a ne světlo, které se odrazí od povrchu. Toto je dobře pozorovatelné, když se laserovým ukazovátkem posvítí na zrcadlo. Světelný vzor je nestálý a po okrajích je vidět šum. Lesklému povrchu se zabraňuje pomocí různých sprejů. Jedním z nich je například křídový. Další možností je zdrsňení povrchu, ale vždy je třeba počítat s tím, že každá nanesená vrstva se promítne i do rozměrů součásti. [28] [29]

Zvláštností je využití sklonů úrovně šedi na okrajích pruhů, jak je naznačeno na následujícím Obrázek 21. [28]



Obrázek 21: Pruhová projekce [29]

Pomocí nejméně tří vzorů pruhů, jejichž průběh intenzity je sinusového tvaru, zaznamenaných v rychlém sledu se pro všechny body na povrchu určí přesné boční posuny pruhů, které jsou „ukazateli“ hodnoty intenzity. Úrovně intenzity (šedé) jsou vytvářeny digitálně pomocí mikro zrcadlových displejů s vysokým rozlišením (DLP). [30]

Tento jev zlepšuje triangulaci a až o dva řády zlepšuje výškové rozlišení.

Výhoda této metoda spočívá v tom, že lze měřit a skenovat součásti s širokým rozměrovým spektrem a s relativně velkou rychlostí. Pruhová projekce nalezne využití jak při skenování malých, tvarově složitých dílů, tak při zkoumání plechů, které mají rozměry až v jednotkách metrů. Přesnost měření je v desítkách

mikrometrů, ale vše záleží i na tom, v jakém stavu je povrch součásti a jak přesně jsou naskenované body zpracovány. [30]

Například objem spalovacích komor motorů lze měřit desetkrát přesněji než klasickým měřením objemu na bázi plynů nebo kapalin. [30]

Jako Hardware pro proužkovou projekci lze použít 3D scanner ATOS, zobrazený na Obrázek 22. Jednotka promítá na snímaný objekt různé obrazce, které jsou následně zaznamenávány dvěma kamerami. Zaznamenaný obraz po každém jednom pixelu se automaticky vyhodnotí pomocí počítače, který pro každý pixel vypočítá 3D souřadnice. K zaměření se používají i referenční body, které pomáhají k vytvoření souřadnicového systému. Během každého měření software online kontroluje, zda nedošlo ke kalibraci systému, pohybu snímače nebo jakýmkoli změnám okolního prostředí, které by mohly měření ovlivnit.

ATOS generuje data ve formě mraku bodů nebo polygonové sítě, kterou lze upravovat. [30]



*Obrázek 22: Scanner ATOS [54]*

Dalším přístrojem pro proužkovou projekci je ZEISS Commet . Pomocí tohoto scanneru lze pracovat velmi efektivně, protože snímač má svůj vlastní software ZEISS Colin 3D, což zajišťuje velkou rychlost práce. Podobně jako u scanneru ATOS se jedná o velmi flexibilní systém. Lze jej použít jak pro malé, tak pro velké

součástí a lze jej snadno konfigurovat pomocí různých objektivů a je vhodný i pro dřílenské použití. [31]

Díky vysoké intenzitě světla a rychlé kameře na senzoru ZEISS COMET, zobrazeném na Obrázek 23, je možné použití na různých místech a površích. Systém poskytuje přesná 3D data a automaticky rozpoznává změny vibrací a expozice. [31]



Obrázek 23: ZEISS Comet [32]

### 3.2.5 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie, jak už název napovídá, je technika trojrozměrného souřadnicového měření, která využívá fotografie jako základní médium pro metrologii nebo měření. Základním principem používaným ve fotogrammetrii je triangulace. Pořízením fotografií z nejméně dvou různých míst lze z každého fotoaparátu vytvořit takzvané "přímky pohledu" na body na objektu. Tyto zorné přímky, někdy nazývané paprsky kvůli své optické povaze, se matematicky protínají, čímž se získají trojrozměrné souřadnice naměřených bodů. [33]

Služby fotogrammetrie v oblasti topografického mapování jsou dobře zavedené, ale v posledních letech se tato technika široce uplatňuje v architektuře, průmyslu, strojírenství, soudním lékařství, podmořské technice, medicíně, geologii a mnoha dalších oborech pro tvorbu přesných 3D dat. [34]

Měření fotogrammetrií vyžaduje systém synchronizovaných kamer, z nichž každá má pevně stanovenou polohu. Fotografovaný model se pohybuje a kamery ho postupně snímají. Synchronizace musí být přesná, protože v každém okamžiku je model natočen do unikátní polohy a jakákoliv další manipulace s kamerami by vnášela nepřesnosti. V závislosti na tom, jaká je požadována rychlost měření se volí vhodné kamery. Nejvíce se ale používají vysokorychlostní. [35]

### 3.2.6 Chromatický senzor bílého světla

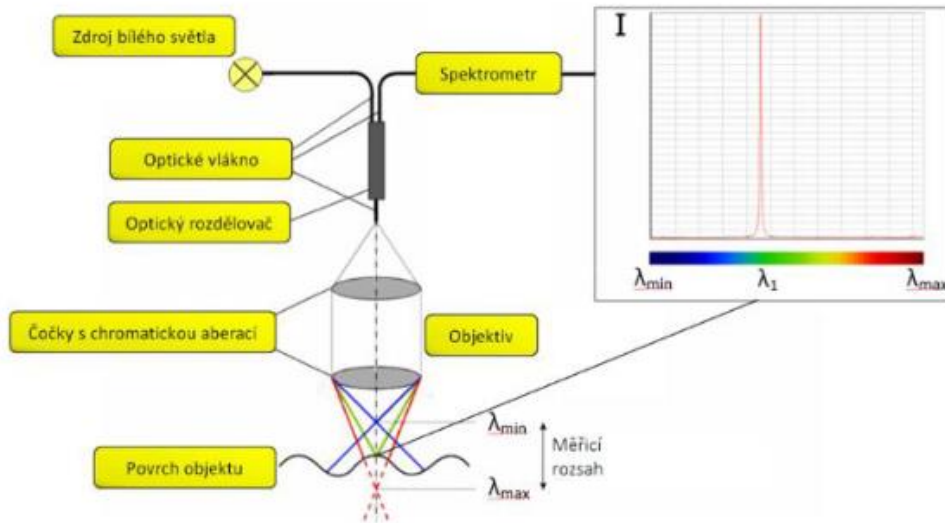
Chromatický senzor bílého světla je rychlý optický senzor pro měření vzdálenosti, který lze přesně nakonfigurovat pro danou aplikaci. K tomu jsou k dispozici různé standardní a speciální senzorové hlavy s různými měřicími rozsahy. Chromatický senzor bílého funguje stejně dobře na površích s vysokou i nízkou odrazivostí. Díky jasnému světelnému zdroji a rychlosti měření až 4 kHz se senzor používá pro různé aplikace v oblasti řízení průmyslové výroby a výzkumu a vývoje. [36]

Princip měření, zobrazený na Obrázek 24, pomocí této technologie je založen na zaostřování polychromatického bílého světla na snímaný povrch pomocí systému složeného ze soustavy čoček. Tyto čočky jsou uspořádány do konfokálního uspořádání. Tato soustava je cíleně „vadná“ a rozděljuje tak světlo na jednotlivé monochromatické složky, což jsou „paprsky“ jednotlivých vlnových délek, které nejsou různě posunuté. Na povrch měřeného dílu se tedy promítají různé vlnové délky. [37]

V optické soustavě dvou čoček nebo zakřivených zrcadel, která jsou konfokálně uspořádaná odpovídají ohniskové vzdálenosti těchto čoček nebo zrcadel. Ostrý obraz dává pouze světlo, které projde tzv. fokálním bodem. Světlo, které tímto bodem neprojde nevytváří ostrý obraz, ale je zobrazeno. Toto světlo se dá odfiltrovat pomocí bodové clonky. [37]

Světlo, které se odrazí od povrchu směřuje a putuje zpět do spektrometru, který vyhodnocuje největší intenzitu odražené vlnové délky a na základě tohoto vyhodnocení přístroj přesně změří vzdálenost měřeného bodu. Postupným

skanování celého povrchu lze vytvořit kompletní topografický obraz ve formě mračna bodů. [38]



Obrázek 24: Schéma chromatického senzoru bílého světla [39]

### 3.2.7 Výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie se řadí do bezkontaktních metod měření, kdy je základem rentgenové záření. Využití rentgenu je všeobecně známé v lékařství, ale svou úlohu sehrává čím dál tím více i v průmyslu. Užítí nachází zejména při nedestruktivním zjišťování vnitřních vad, ale lze také měřit i vlastnosti povrchu. [40]

Základním principem této metody je katodové záření, které se získává v rentgenové trubici, ve které jsou umístěny elektrody. Na katodu je přiváděno elektrické napětí, které z katody vyrazí elektrony, které putují k anodě. Na wolframové anodě se pohybová energie elektronů mění na tepelnou a zároveň zde vzniká rentgenové záření. [40]

Když prochází rentgenové záření materiálem, je částečně pohlcováno a částečně prochází až za objem zkoumaného tělesa, kde je zachyceno na detektoru. Právě množství záření, které prošlo a bylo zachyceno vytvoří snímek. Aby byl proměřen celý díl, je třeba ho takto nafotit ze všech úhlů a speciálním softwarem poskládat 3D model tělesa. [40]

Nevýhody počítačové tomografie jsou zejména vysoká pořizovací cena přístroje a potřeba zkušené obsluhy, protože každý materiál absorbuje záření jinak a je třeba nastavit správně vstupní parametry, aby nedocházelo k různým odrazům a podobně. [40]

## 3.3 Zpracování získaných dat v rámci RE

Každý z výše popsaných skenovacích postupů generuje data v jiné formě. Data, která naměříme dotykovým systémem CMM jsou již parametrizovaná a automaticky z nich lze dopočítávat různé geometrické tvary. Když jsou ale použity bezkontaktní měřicí systémy, je výstupem většinou mrak bodů, se kterým je nutné ještě pracovat, protože tento mrak neneso mnoho informací o skenované součásti. [41]

Po skenování, kdy bylo třeba výrobek skenovat několikrát, se stává, že dochází k tomu, že se body v jednotlivých skenech neshodují. To může být způsobeno jinou polohou skeneru. Díly se skenují víckrát téměř pokaždé, protože není možné zachytit celý díl pouze z jedné polohy. Z tohoto důvodu se musí polohy jednotlivých bodů průměrovat. Body se musí filtrovat po každém měření. Povrch měřeného tělesa velmi často vytváří šum, který výsledky ovlivňuje. [41]

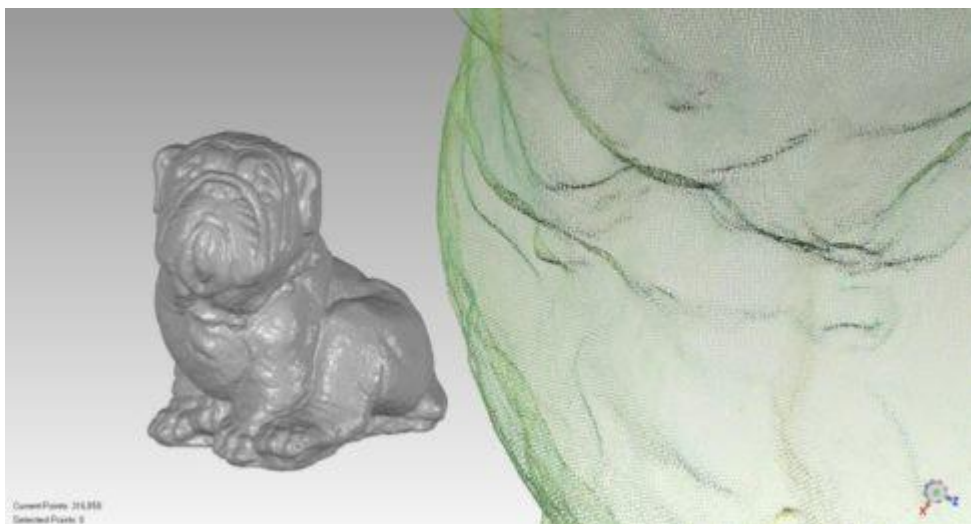
### 3.3.1 Křivky

Jak již bylo zmíněno výše, výstupem z 2D měření jsou křivky, které reprezentují okrajové linie objektu a lze pomocí nich zjistit hodnoty zkosení, rádiusů, rozměrů děr a jiných elementů. S těmito křivkami se pracuje jako např. s hodnotami získanými posuvným měřítkem, pomocí kterých vyrobí výkres. [41]

### 3.3.2 Mračno bodů

Mrak bodů definuje 3D objekt pomocí nasnímaných bodů. Vidět je to na Obrázek 25. Každý z těchto bodů je popsán souřadnicemi v prostoru, tedy polohou v ose  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Přídavnou hodnotou pro tyto body může být směr normály a informace o barvě bodu. Tyto body mezi sebou nemají žádné vazby. S tímto mrakem se velice špatně pracuje, protože netvoří žádný povrch ani objem dané součásti. Při provádění řezu mračnem bodů se zobrazují v rovině řezu pouze protnuté body. Tyto výstupní formáty používají zejména skenery, jejichž snímaná oblast je široká. [41]

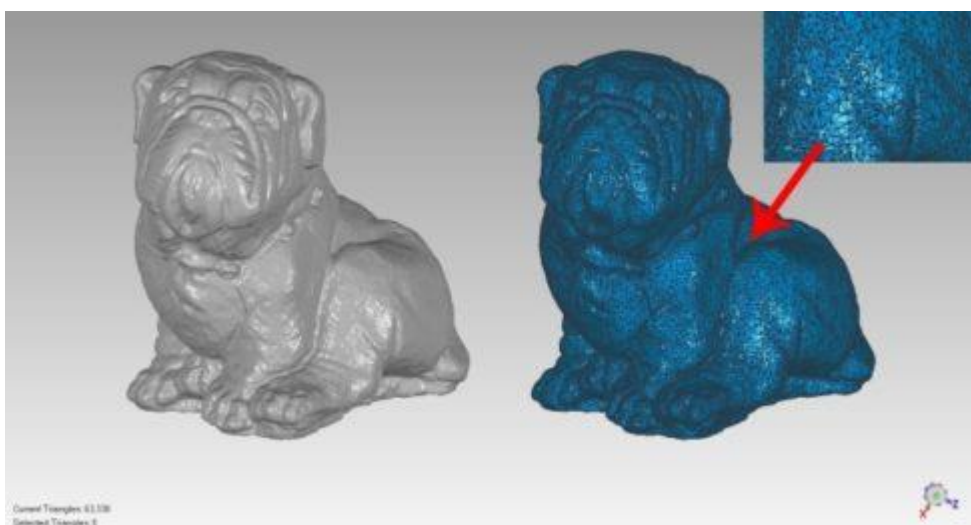




Obrázek 25: Mračno bodů získané skenováním [41]

### 3.3.3 Polygonizace

Data jsou vyjádřena pomocí trojúhelníkové sítě (Obrázek 26), která vznikla proložením naměřeného mraku bodů (tři nejbližší body mraku bodů jsou proloženy trojúhelníkem). Tato síť již má daný objem a tvoří povrch. STL data dokáže většina CAD systémů načíst pouze jako grafiku a je potřeba je dále zpracovávat – parametrizovat. STL data jsou používána jako zdroj dat pro přímý tisk na všech 3D tiskárnách. Jedná se o nejjednodušší vyjádření tvaru 3D modelu, ale tento soubor v sobě nenesou informace např. o barvě. [41]



Obrázek 26: zesíťovaný model [41]

Existují i jiné formáty, které nesou informaci např. i o barvě či textuře povrchu, např. formát \*.OBJ. [41]

## 3.4 Parametrizace

Výsledkem polygonizace je síť, která je tvořena trojúhelníky. Problém s touto sítí je, že nenese informace o geometrických tvarech, kterými je každá součást tvořena, a se kterými už mohou pracovat CAD a CAM softwary. Dalším krokem je tedy vytvoření ploch, tzv. parametrizace. Převod sítí na plochy lze provést automaticky, za použití softwaru, nebo ručně. O tom, jakou metodu použít, se rozhoduje na základě složitosti povrchu skenovaného dílu.

Automatická parametrizace za použití softwaru pracuje na principu, že polygonová síť nebo mrak bodů jsou prokládány čtyřbokými plochami - NURBS, které reprezentují tvar součásti. Tímto způsobem je vytvořen objemový model, který složí pro CAM a CAD programy a pro následné obrábění. Nevýhodou je to, že programy na automatické převedení sítí do NURBS jsou drahé a pro běžného uživatele až nedostupné.

Alternativou k automatickému proložení sítě plochami je ruční převod na NURBS. V tomto případě slouží polygonová síť jako předloha pro přemodelování v klasickém CADu. Oproti automatické parametrizaci je tento způsob určitě časově náročnější, ale je možné sledovat odchylky od původní sítě a dělat různé úpravy modelu. Tento způsob je také využíván při práci s výsledky topologické optimalizace, protože programy pro topologickou optimalizaci vytvoří pouze aditivně vyrobitelné modely a tímto způsobem je podle předlohy předělat tak, aby šly vyrobít klasickými způsoby.

Mnohdy se také stává, že je získaná síť nekompletní, protože se třeba laserová linie nedostala na dno válce nebo ji nebylo možné nasnímat. Chybějící body válce se s vyšší přesností dopočítají pouze obtížně a spíše se to nepovede. Když je ale známá výška válce a poloměr jeho základny, je snadné nahradit nenaskenovanou část ručně parametrickým válcem. [42]

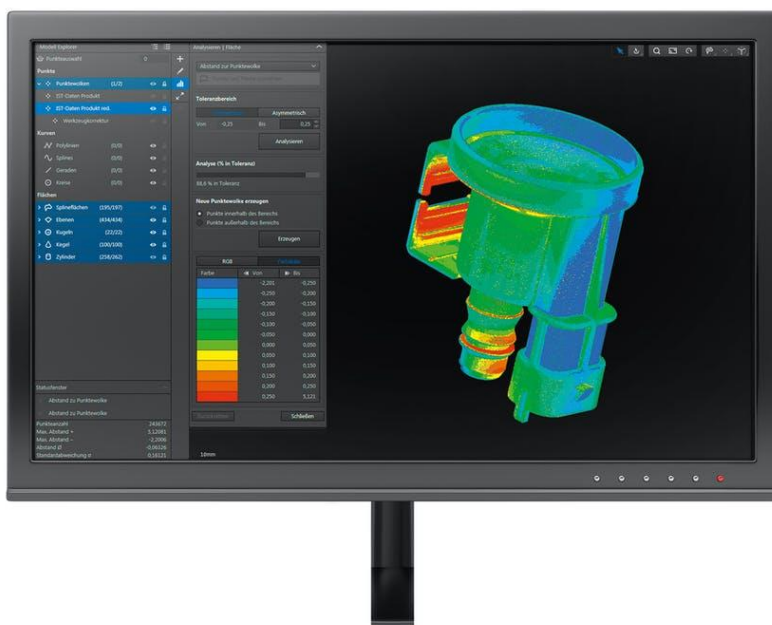
Pro samotné provedení parametrizace se využívá celá řada programů a na trhu jich je velké množství. Výčet těch nejpoužívanějších lze vidět níže.

### 3.4.1 Siemens NX

Software Siemens NX má největší výhodu v tom, že se jedná o flexibilní řešení. Je možné v něm modelovat jako v CAD programech typu Inventor, vytvářet výkresy, používat jako CAM software a také, což je důležité zejména pro tuto práci, umožňuje práci se soubory typu STL, což běžné CAD programy neumí. NX umožňuje naimportovat soubor STL a hned následně vytvořit polygonovou síť, kterou lze začít okamžitě upravovat podle potřeb uživatele. Tento program také umožňuje začít vytvářet podpěry pro 3D tisk, vytvářet formy na základě tvaru, zahrnout jej do sestavy, analyzovat jej nebo provádět jakékoli jiné operace, které by se prováděly s daty CAD. [43]

### 3.4.2 ZEISS Reverse Engineering

ZEISS Reverse Engineering (Obrázek 27) je software pro reverzní inženýrství přímo od výrobce měřících zařízení ZEISS. Prvním krokem je nahrání naskenovaného mraku bodů. Tento mrak nemusí být nutně získán prostředky od společnosti ZEISS. Mraky se importují v souboru typu STL. Dále následuje jen několik málo kroků a výsledkem je „vodotěsný“ model CAD, který je možné bez problémů importovat do kteréhokoliv CAD softwaru. [44]



Obrázek 27: Prostředí ZEISS Reverse Engineering [45]

### **3.4.3 Geomagic Design X**

Stejně jako předchozí softwary je Geomagic Design X nástroj pro zpracování naskenovaného mraku bodů a jeho následné zpracování, kdy na konci procesu je 3D CAD model. Dá se také propojit přímo s CAD softwarem a 3D parametrické modely lze s úplnou historií následně zpracovat v jakémkoliv CADu. [46]

### **3.4.4 GOM Inspect Pro**

Gom Inspect Pro je software pro vyhodnocování 3D dat. Jako jiné programy dokáže zpracovat mrak bodů a vytvořit parametrický CAD model, ale jeho „přidaná hodnota“ je v tom, že pomocí tohoto softwaru lze provádět i měření 3D modelů, digitální montáž a jiné kontrolní úlohy. [47]

## 4 Aditivní technologie pro zpracování polymerů

Aditivní technologie a zejména 3D tisk je dnes asi nejvíce spojován s domácími nadšenci do technologie, kteří si na stolních 3D tiskárnách, nejčastěji v provedení FDM, tisknou nejrůznější předměty. To však, ale není jediné využití. 3D tiskem se dnes vyrábí části kusově vyráběných dílů a také velké části přípravků, jejichž výroba by byla standardními technologiemi velice náročná a nákladná. [48]

Základem aditivní výroby je kladení 2D vrstev materiálu na sebe, podobně jako když se tiskne fotografie inkoustovou tiskárnou na papír a postupným vrstvením materiálu vzniká 3D model. [48]

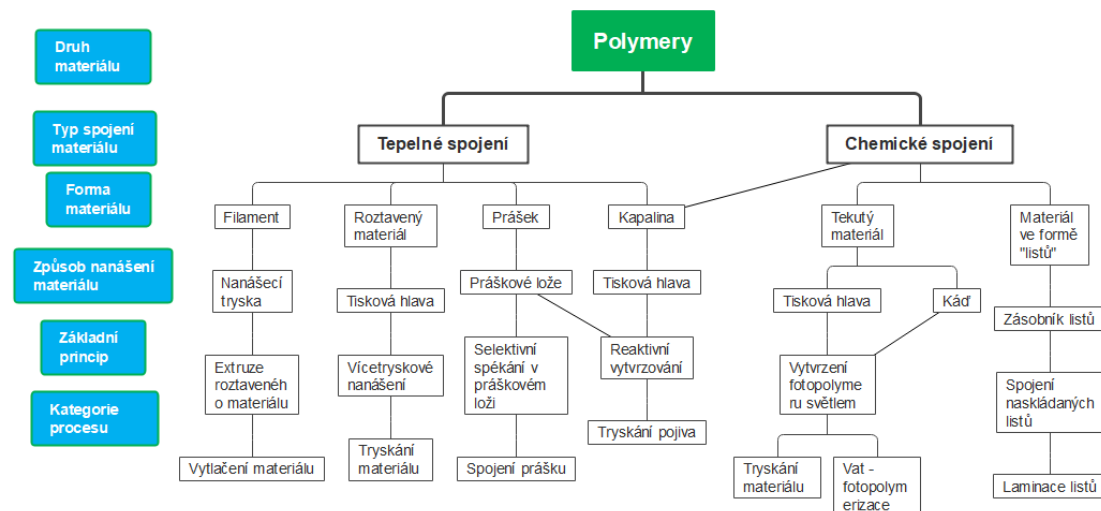
Největší výhodou této metody je to, že není třeba žádné složité přípravy výroby. Stačí pouze model a software, který vytvoří kód pro tiskárnu, takže je ideální pro rychlé prototypování. Díly lze rychle vyrobit a po použití zlikvidovat. Také je možné vyrábět i složité geometrie, které jinou technologií vyrobit nelze. Aditivní technologie tedy do značné míry mohou usnadnit proces RE, pokud jej chceme dotáhnout do stupně výroby kopie k původnímu dílu. [48]

Jednou z největších nevýhod 3D tisku je to, že díl je vlivem procesu anizotropní nebo ne úplně vyplněn, což znamená, že obvykle postrádá materiálové a mechanické vlastnosti, které mají díly vyrobené tradičními metodami. Kvůli kolísání podmínek chlazení nebo vytvrzování jsou různé tisky stejného dílu také náchylné k mírným odchylkám, což omezuje konzistenci a opakovatelnost. [48]

3D tiskáren je několik typů. Všechny jsou ale založené na stejném principu - vrstvení materiálu. Jejich použití se liší v závislosti na geometrii a požadavcích na výrobek. Nedá se proto jednoznačně určit, který typ je univerzální a naprosto vhodný pro kterékoliv použití. Už při konstrukci dílu je potřeba myslet na to, na jaké tiskárně se bude výrobek tisknout. Typy tiskáren jsou popsány níže. [48]

## 4.1 Dělení 3D tiskáren a základní funkční principy

Rozdělení aditivních technologií je popsáno normou ČSN EN ISO/ASTM 52900, která technologie rozděluje podle materiálů, dále podle jejich spojení, formy, způsobu nanášení. Dále podle základního principu metody a podle kategorie procesu. Schéma lze vidět na Obrázek 28. [49]



Obrázek 28: Rozdělení aditivních technologií

Protože sedlo v praktické části bude tisknuto na FDM tiskárně, bude pozornost v následujících odstavcích věnována zejména jim.

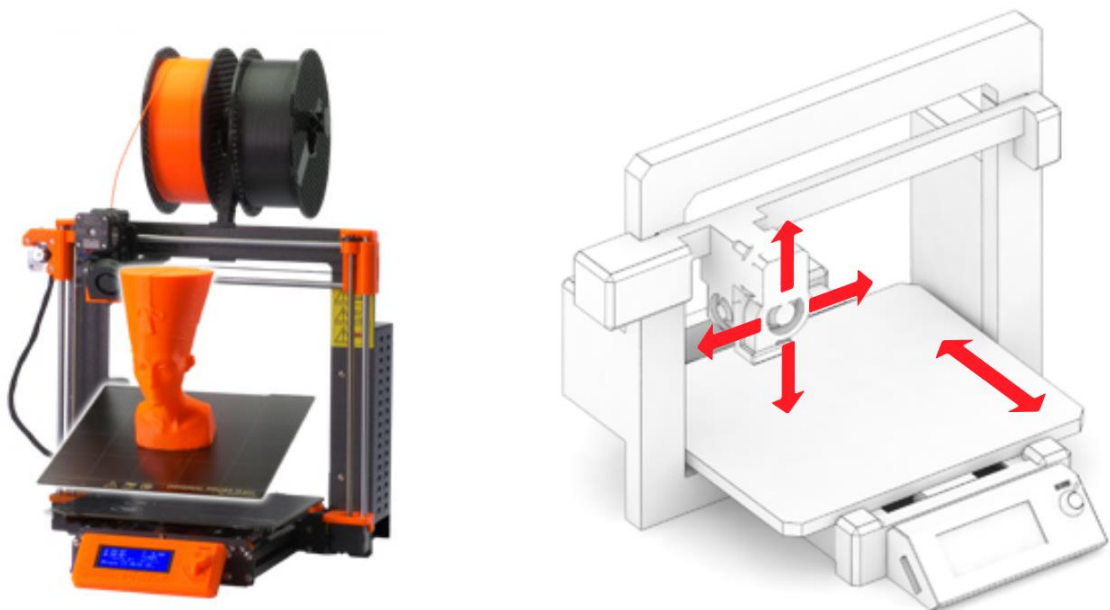
### 4.1.1 FDM (FFF)

Jedná se o nejčastější typ tiskárny, jejíž cena se pohybuje od několika tisíc korun až k milionům. FDM je zkratka z anglického Fused Deposition Modeling a FFF Fused Filament Fabrication. Obě tyto zkratky jsou odkaz na stejnou technologii tisku. Materiál je do tiskové hlavy/extruderu přiváděn v podobě drátu, kde je následně nataven a tryskou protlačen na velmi tenkou strunu. Tato struna je dále přiváděna na tiskovou podložku, která je u lepších tiskáren vyhřívaná, aby bylo dosaženo nižší anizotropie vlastností. Filament – drát se obvykle prodává v tloušťce 2,85 mm a je protlačen na průměr v řádech desetin milimetru u levnějších tiskáren. Během tisku sedla na tiskárně Stratasys byl použita tloušťka vlákna 0,0018 mm. [50]

FDM tiskárny se vyrábějí v několika konstrukčních řešeních.

#### 4.1.1.1 Kartézské

Tyto tiskárny mají alespoň tři motory. Každý z nich zajišťuje pohyb tiskové plochy nebo tiskové hlavy v jedné ose, jak lze vidět na Obrázek 29. Osa zajišťuje posouvání výtisku o výšku jedné vrstvy. Tyhle vrstvy se vytvářejí v softwarech, kde se každý model „naslicuje“ a vytvoří postup v podobě kódu, kterým se tiskárna řídí. Kartézské tiskárny jsou nejlevnější typ tiskáren, a právě tyto tiskárny bývají ve výbavě domácích nadšenců do 3D tisku. Nevýhodou kartézských tiskáren je horší kvalita povrchu při rychlém tisku a nutnost při konstrukci počítat s umístěním a následným odstraněním podpěr, které se například u uzavřených dutin odstranit nedají. [50]

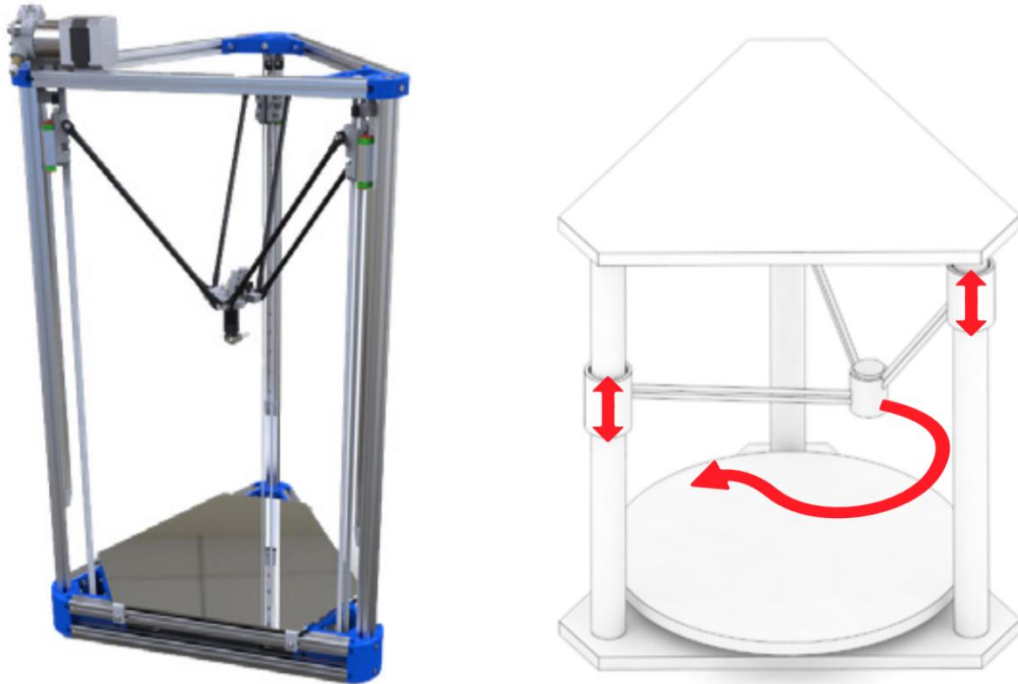


Obrázek 29: Konstrukce kartézské tiskárny [50]

#### 4.1.1.2 Delta tiskárny

U tohoto typu tiskárny se nepohybuje tisková podložka, ale shodně s FDM tiskárnami se zde nachází tři motory. Ty pohybují extrudérem, který je pomocí tří ramen spojen se třemi sloupy. Celou konstrukci lze vidět na Obrázek 30. S těmito sloupy jsou spojeny již zmíněné motory. Extrudér u této tiskárny je velice lehký a konstrukce této tiskárny je navržena pro rychlý tisk. [50]

Hlavní nevýhodou této tiskárny je složité seřizování motorů a celkově složitá konstrukce, což se promítá i do ceny náhradních dílů. Proto není tato tiskárna příliš rozšířena. [50]



Obrázek 30: Delta tiskárna [50]

#### 4.1.1.3 Polar tiskárny

Polar tiskárna, ukázka na Obrázek 31, pracují, jak už název napovídá, v polárních souřadnicích, jejichž základem je to, že body jsou umístěné po oblouku a ne ve tříosém systému. Hlavní pohyb u těchto tiskáren vykonává tisková podložka, která se pohybuje v jedné ose a zároveň se otáčí. Tisková hlava se pohybuje pouze nahoru a dolů. Toto řešení umožňuje tisknout velké plochy. Pro vysokou cenu náhradních dílů a také kvůli tomu, že jsou Polar tiskárny zatím ve formě vývoje, není tato konstrukce tiskáren příliš rozšířena. [50]





Obrázek 31: Polar tiskárna [50]

#### 4.1.2 SLA (Stereolithografie)

Základním principem této metody je, na rozdíl od FDM tisku, kdy je materiál ve formě drátu, vytvrzování fotosenzitivní pryskyřice, což se dá zjednodušeně popsat jako vytvrzování kapaliny vrstvu po vrstvě. To se obvykle děje pomocí UV laseru. Vytvrzený materiál se přichytává na platformu (tiskovou podložku), která podle konstrukce tiskárny buď sjíždí nebo vyjíždí. [50]

Největší výhodou této technologie je to, že lze vytvrzovat opravdu tenké vrstvy v řádech desítek mikrometrů. To znamená, že kvalita tisku se pohybuje na opravdu vysoké úrovni a jednotlivé vrstvy nejsou pouhým okem rozeznatelné, což se nedá tvrdit o FDM tisku. Dále je také možné přebytečnou nevytvrzenou pryskyřici používat opakovaně. [50]

Nevýhodou této metody je to, že materiál podpor musí být stejný jako materiál výrobku, čímž odpadá možnost podpory rozpouštět. [50]

Existuje několik způsobů osvětlování pryskyřice. Jejich popis následuje níže. [50]

#### 4.1.2.1 Laser SLA

Jednotlivé vrstvy jsou vytvrzovány pomocí laserového paprsku UV světla, který je usměrňován pomocí dvou zrcadel. Tento systém je jednoduchý, ale může být zdoluhavý. Čas vytvrzení jedné vrstvy závisí na ploše průřezu vrstvy. [50]

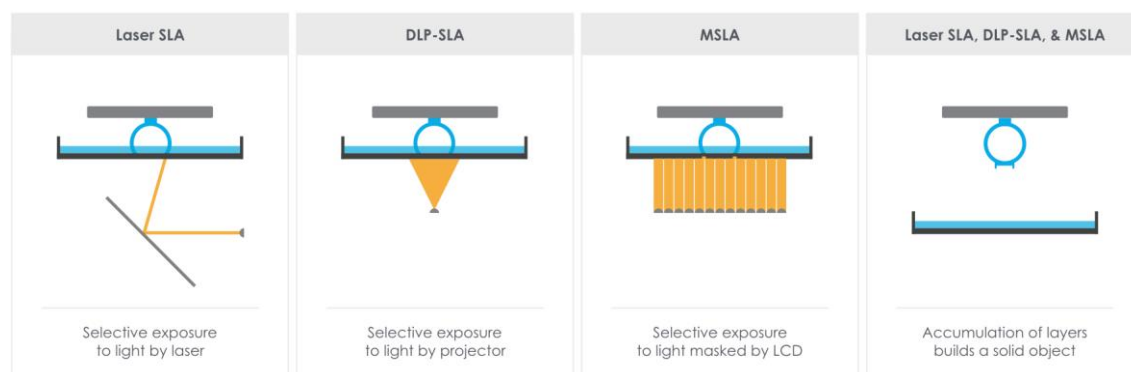
#### 4.1.2.2 MSLA – Mask Stereolithography

Při této metodě nejsou vrstvy vytvrzovány laserovým paprskem, ale UV LED světelným zdrojem, před kterým se nachází poloprůhledná LCD obrazovka, na které se vyskytují černé – nepropustné a bílé – propustné pixely. Světlo prochází v celé ploše vytvrzované vrstvy pouze přes bílé pixely, čímž se dosáhne rychlého celistvého vytvrzení bez žádné na ploše vrstvy. [50]

#### 4.1.2.3 DLP – Digital Light Processing

Celá vrstva je osvětlována UV světlem z projektoru, který promítá tvar vytvrzované vrstvy. Každá vrstva se vytvrzuje najednou a vždy po stejně dlouhou dobu, což snižuje hodnotu anizotropie.

Schéma všech SLA metod lze vidět na [50]



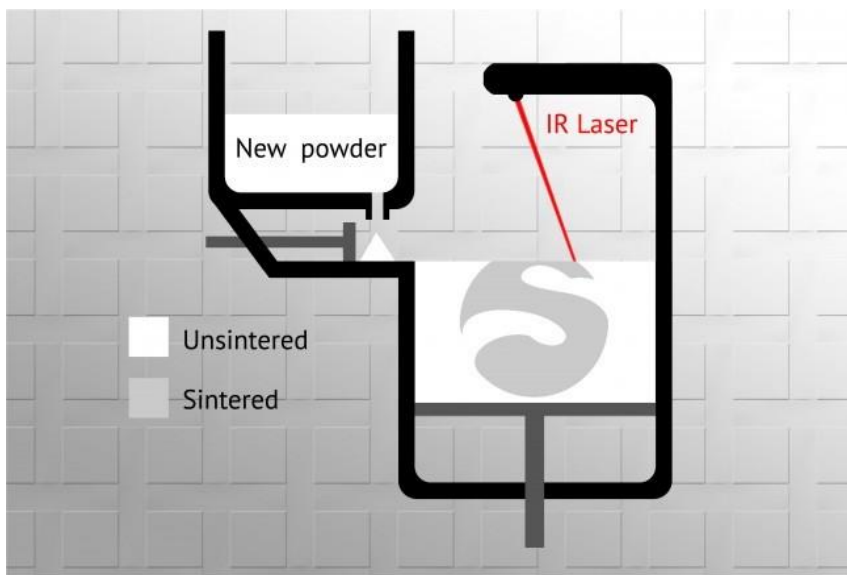
Obrázek 32: Zleva: Laser SLA; DLP - SLA; MSLA; hotový výtisk [50]

#### 4.1.3 SLS

Další metodou aditivních technologií je SLS – Selective Laser Sintering. Vstupním materiálem pro tento proces je prášek, který se vždy po jedné vrstvě pomocí válečkového nanašeče nanese ze zásobníkové komory do komory tiskové, kde se pomocí laserového paprsku speče do celistvé vrstvy. Tento postup se opakuje, dokud není výrobek hotový. Schéma lze vidět na Obrázek 33. Po dokončení procesu je potřeba dostat díl z práškového lože, což se

obvykle provádí odsáváním a tento prášek lze opětovně použít. Jak je z logiky věci patrné, v dutinách výrobku prášek zůstává a je třeba myslet na to, jak ho dostat pryč. Obvykle je nutné s tímto problémem počítat už při konstrukci a dutinám se vyhnout. Druhou možností je do dutiny vyvrtat díru, kterou lze prášek vysypat. Výtisky vyrobené touto metodou jsou velmi přesné.

Tato metoda se pod zkratkou DMLS – Direct Metal Laser Sintering používá i při 3D tisku kovů. [50]



Obrázek 33: Schéma SLS [50]

#### 4.1.4 MJF

Jemná vrstva prášku se rozloží po celé tiskové ploše a ohřeje se na teplotu blízkou teplotě jeho spékání. Tisková hlava při pohybu nad tiskovou plochou stříká drobné kapičky inkoustu (spékací látky) v požadovaném tvaru každé vrstvy. Následně vysoce účinná infračervená lampa vytvrdí ta místa, která byla postříkaná spékací látkou. Tisková plocha se posune o jednu vrstvu níže a celý proces se opakuje. [51]

#### 4.1.5 Polyjet

Polyjet je technologie 3D tisku poskytovaná firmou Stratasys. Tato technologie, stejně jako SLA, využívá proces fotopolymerizace pryskyřice, což je proces, který pomocí UV světla vytváří pevné vazby mezi řetězci molekul, čímž se formují polymery. Tyto polymery pak tvoří, vrstvu po vrstvě, výsledný 3D model. Materiál je uchováván v cartridgech, podobně jako u klasické kancelářské tiskárny. Tento

materiál je distribuován do tiskové jednotky, která má v sobě počítačově řízené tiskové hlavy. V tiskových hlavách jsou miniaturní otvory, skrze které je vstříkován materiál na platformu. Na stranách tiskové jednotky jsou silné UV lampy, které během procesu tisku neustále svítí. Samotný tisk tedy probíhá tak, že tisková jednotka přejíždí přes platformu a v místě, kde má být díl, vstříkne velmi malé množství materiálu. Díky tomu, že se tisková jednotka pohybuje ze strany na stranu, dojde k osvitě vstříknutého materiálu pomocí bočních UV lamp, což způsobí okamžité vytvrzení materiálu. Díky tomu, že je materiál okamžitě vytvrzený, není potřeba po dokončení stavby žádné další dodatečné vytvrzení.

[52]

## 4.2 Základní materiály pro 3D tisk metodou FFF

### 4.2.1 ABS

Filament z ABS je nejběžněji používaný materiál pro 3D tisk. Používá se pro díly v interiéru automobilů, spotřebičů a obalů na mobilní telefony. Nejlepším příkladem jsou však kostky LEGO. Jedná se o termoplast na bázi polybutadienu, díky čemuž je pružnější a odolnější vůči nárazům. ABS lze také použít v práškové formě pro použití v tiskárnách SLS. Teplota trysky při tisknutí ABS se pohybuje v rozmezí 230 °C a 260 °C. Je to houževnatý materiál, který snadno odolá teplotám -20 °C až 80 °C. Teplota podložky by měla být okolo 100 °C. Jedná se o recyklovatelný materiál a lze jej chemicky svařovat. Během tisku se doporučuje používat 3D tiskárnu s uzavřenou komorou pro omezení emisí částic ABS.

### 4.2.2 PLA

Tento materiál je známý jako kyselina polyléčná (Polylactic acid). PLA má výhodu v tom, že je na rozdíl od ABS biologicky odbouratelný a vyrábí se z obnovitelných surovin, jako je kukuřičný škrob. Kyselina polyléčná je jedním z nejjednodušších materiálů k tisku, i když má tendenci se po 3D tisku mírně smršťovat. Během tisku PLA na rozdíl od ABS není potřeba vyhřívaná podložka. PLA také tiskne při nižší teplotě než ABS a to mezi 190 °C až 230 °C. [53]

S PLA se obtížně manipuluje, protože rychle chladne. Je také důležité zmínit, že modely se mohou při kontaktu s vodou znehodnotit. Materiál je však konzistentní, snadno se používá a je dodáván v široké škále barev, takže je vhodný pro FDM 3D tisk. Není ale teplotně odolný a odolný proti UV světlu. [53]

### **4.2.3 PET**

PET neboli polyethyltereftalát je běžně k vidění jako materiál jednorázových plastových lahví. PET je ideální vlákno pro jakékoli díly určené pro styk s potravinami. Kromě toho je materiál poměrně tuhý a má dobrou chemickou odolnost. Pro dosažení nejlepších výsledků při tisku s PET se doporučuje tisknout při teplotě trysky 75–90 °C. Tento materiál se běžně prodává v podobě průsvitných vláken. Mezi výhody PET patří to, že materiál při tisku neuvolňuje žádné nebezpečné emise a je 100% recyklovatelný. [53]

### **4.2.4 PETG**

PETG (Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate) je termoplast široce používaný na trhu aditivní výroby, který kombinuje jednoduchost 3D tisku PLA a sílu ABS. Jedná se o amorfní plast, který lze 100 % recyklovat. Ke snížení křehkosti se přimíchává do PET glykol. [53]

### **4.2.5 TPU**

Termoplastický polyuretan (TPU) je pružný termoplast a jednou z jeho vlastností je odolnost proti oděru a velká flexibilita. Používá se v řadě výrobních procesů pro spotřebitelské i průmyslové použití. 3D tištěné díly z TPU jsou mechanicky odolné a mají schopnost odolat okolní teplotě až 80 °C.

TPU vlákno má mnoho vlastností, díky kterým nabízí širokou škálu využití. Je odolný vůči oděru, oleji, chemikáliím, díky čemuž je ideální pro použití v průmyslových odvětvích, jako je automobilový průmysl. Vytištěné díly z TPU jsou také odolné vůči nízkým teplotám, což znamená, že nekřehnou a nedochází tak k jejich poškození. Oproti TPE, což je také flexibilní filament, se TPU o něco lépe tiskne a lépe si zachovává elastické vlastnosti při nižších teplotách. Má také vynikající přilnavost mezi vrstvami a během tisku nedochází k žádnému zvlnění nebo delaminaci. [54]

## 5 Vlastí aplikace procesu reverzního inženýrství pro vytvoření ergonomického sedla jízdního kola

Jak již bylo zmíněno v úvodu, cílem práce je popsat a zrealizovat proces reverzního inženýrství jako zdroje dat pro aditivní technologie. Jako příklad výrobku, který bude fyzicky vyhotoven, bylo vybráno cyklistické sedlo vyrobené na míru pro konkrétního jezdce.

Cyklistické sedlo bylo vybráno z toho důvodu, že osobně rád jezdím na kole a dle mého názoru nejsou 3D ergonomická sedla na trhu úplně rozšířená. Také jeho tvar není úplně jednoduchý a běžnými technologiemi není jednoduché ho vyrobit. Je tedy vhodným předmětem pro aditivní technologie. Sedlo vyrobené v rámci této práce bude navíc z odlehčené struktury, což nelze jinak vyrobit než za použití 3D tisku. Dále se jedná o výrobek, který každý den používají miliony lidí a jeho cenové rozhraní se pohybuje od přibližně sta korun až do cen přesahujících jedenáct tisíc, kde se pohybují výše zmíněné 3D tištěné sedla značky Specialized, která obsahují odlehčenou strukturu, ale nejsou vyráběná na zakázku.

V krátkosti tedy bude vyráběno sedlo, které bude tvarované pro konkrétní osobu, bude obsahovat odlehčenou strukturu a za co možná nejnižší náklady. Je třeba také uvést, že výrobek musí být funkční a musí být možno jej bezpečně využívat.

Nástrojem pro získání modelu sedla bude použita proužková projekce, pomocí které bude získán model otisku zadku. Tento model bude následně upraven a výsledkem by měl být model stélky, který bude možné nalepit na desku získanou ze zakoupeného sedadla.

## 5.1 Konstrukce

Aby bylo možné vysvětlit další kroky práce, je dobré si shrnout, konstrukci cyklistických sedel. Každé sedlo je připevněno k sedlové tyči, která je spojena s rámem kola. Na konci této tyče je šroub, který proti sobě stahuje dvě desky, které mají z jedné strany takový tvar, aby do nich zapadly „ližiny“ sedadla, což jsou dva dráty, které zprostředkovávají spojení sedlové tyče a sedla. Tyto dráty vedou od špičky sedla k jeho konci. Lze to vidět na Obrázek 34. Dráty jsou spojené s plastovou deskou, která byla vyrobena vstříkáním plastů.



Obrázek 34: Pohled na dolní stranu sedla

Protože by bylo riskantní vyrábět novou nosnou desku pomocí 3D tiskárny, bude použita již hotová, která byla získána z obyčejného sedadla. Tento krok byl zvolen zejména proto, aby při používání vyrobeného sedla nedošlo k nepříjemným zraněním.

Deska i dráty byly spojeny při výrobě, když byly dráty umístěny do formy pro výrobu desky a následně zastříknuty plastem a dohromady poslouží jako

základ pro výrobu ergonomického sedla, kdy bude na desku nalepena vytištěná stélka.

## 5.2 Získání otisku

Jak bylo zmíněno výše, jako základna pro vyráběné sedlo bude sloužit deska a dráty ze zakoupené sedačky. Tato deska bude mít ale ještě jeden účel – pomůcka pro získání otisku sedacích partií cyklisty.

Ve sportovním obchodě bylo zakoupeno sedlo, ze kterého byla odstraněna gumová slupka a pěnová stélka tak, aby zbyla jen samotná nosná konstrukce. Nutno dodat, že sedlo stálo 400 Kč a bylo vybráno, jako nejlevnější mezi sedadly, která již mají sportovnější tvar, kdy je celé sedlo úzké a podlouhlé.

Celý postup demontáže je zachycen na Obrázek 35.



Obrázek 35: zleva - Koupené sedlo, pěnová stélka, očištěná základní deska

Po očištění desky následoval další krok a tím bylo získání otisku, který bude skenován a z něhož bude získán model, který bude upravován.

Aby bylo možné aplikovat proces reverzního inženýrství, bylo nutné získat otisk, který by se dal dobře naskenovat. Pro vlastní skenování byl využit systém proužkové projekce Comet.

Protože realizace otisku probíhala přímo na kole, bylo nutné vybrat takovou hmotu, kterou by bylo možné udržet na plastové desce, která byla získána z původní zakoupené sedačky. Obvykle se pro mnoho typů odlitků lidského těla



používá sádra, ale v tomto případě by bylo její použití poněkud složité, protože sádra se používá v téměř tekutém stavu a postupně schne. Bylo by tedy obtížné ji jakkoliv pevně spojit s plastovou deskou připevněnou k sedlové trubce a zároveň získat otisk.

Po hledání v internetových zdrojích byl udělán závěr, že ideální hmotou pro vytvoření otisku bude bílá plastelína. Tato hmota se dá dobře tvarovat, drží si tvar a při stálé teplotě stálou tuhost, což je veliká výhoda této hmoty, protože při zahřívání měkne. Navíc je matná, což znamená, že nebude třeba upravovat povrch před skenováním.

Na desku byla tedy nanesena modelovací hmota a pomocí plastové špachtle a fénu, kterým byla hmota nahřívána, aby se dala lépe tvarovat. Následně byl z hmoty vymodelován přibližný tvar sedadla. Výsledek lze vidět na Obrázek 36.



Obrázek 36: Modelovací hmota na plastové desce

Deska s hmotou byla následně připevněna ke kolu. Z důvodu ochrany před ušpiněním modelínou byla na bílou hmotu přiložena vrstva potravinářské fólie. Tato fólie je velmi tenká a na výsledek otisku neměla žádný vliv. Navíc bylo možné ji bez problémů z otisku opět sundat, aby nevytvářela lesklou vrstvu při skenování.

Jak lze vidět na Obrázek 36, deska s modelínou byla přidělána jako běžná sedačka ke kolu. Těsně před vytvořením otisku byla modelína opět pomocí fénu zahřáta na takovou teplotu, aby její povrch byl tak měkký a tvárný, aby měl otisk co možná největší kvalitu.



*Obrázek 37: Deska s modelínou přišroubovaná ke kolu*

Otisk byl vytvořen tak, že si cyklista sedl do měkké modelíny a několikrát protočil nohy. Poloha jezdce na kole není při jízdě stálá a bylo tedy potřeba nasimulovat co nejvěrněji jízdu. Ilustraci poskytuje Obrázek 38.



Obrázek 38: Otiskování

Na Obrázek 39 už lze vidět hotový otisk. Na povrchu jsou patrné výstupky půlkulovitěho tvaru a „šev“, který se táhne osou sedla. Všechny tyto útvary vznikly tím, že otisk byl vytvářen cyklistou v cyklistických kalhotách a jejich povrch se přirozeně také otiskl a tyto malé výstupky lze vnímat i jako indikaci, že otisk je opravdu detailní. Před skenováním se otisk nijak neupravoval, ani neuhlazoval. Tyto operace byly provedeny až na digitálním modelu.

Při bližším pohledu na otisk je patrné, že se jedna strana sedla v oblasti, kde se jezdec opírá o sedací kost, propadá více než druhá. Nesymetričnost tohoto typu mohla být způsobena nedostatečným prohřátím hmoty, na což byl ale brán zřetel a tomuto problému byla snaha se již od začátku vyvarovat. Nahřívání probíhalo po celé ploše modelíny v řádech minut. Nejpravděpodobnějším vysvětlením se proto zdá, že cyklista, který otisk vytvářel, nemá zcela rovná záda a na sedlo nedosedá úplně přímo.





*Obrázek 39: Hotový otisk*

Další pozitivní vlastností modelíny je to, že po zchladnutí na pokojovou teplotu je dostatečně tuhá na to, aby mohl být otisk bez větších obtíží transportován například v krabici vyplněné papírem, což byl i případ tohoto konkrétního otisku.

### **5.3 Skenování**

Po vytvoření otisku, který slouží jako jakási vstupní data do praktické části práce, je možné provést samotné skenování. Jako metoda skenování byla zvolena pruhová projekce, protože byla k dispozici na Fakultě strojní.

Protože otisk je měkký, odpadá možnost použití kontaktního měření. Dotyková sonda, která by působila tlakovou silou na modelínu by povrch zcela jistě narušila a nebylo by možné počítat s nějakou přijatelnou přesností.

Aby měl pořízený sken dostatečnou kvalitu a aby by bylo možné jej vytvořit na fakultě strojní, byla vybrána pruhová projekce.

Jako skener byl použit ZEISS Comet L3D 2, který byl osazen objektivem se zvětšením 250x. Rozlišení systému je 2448 x 2050 pixelů a při zvoleném

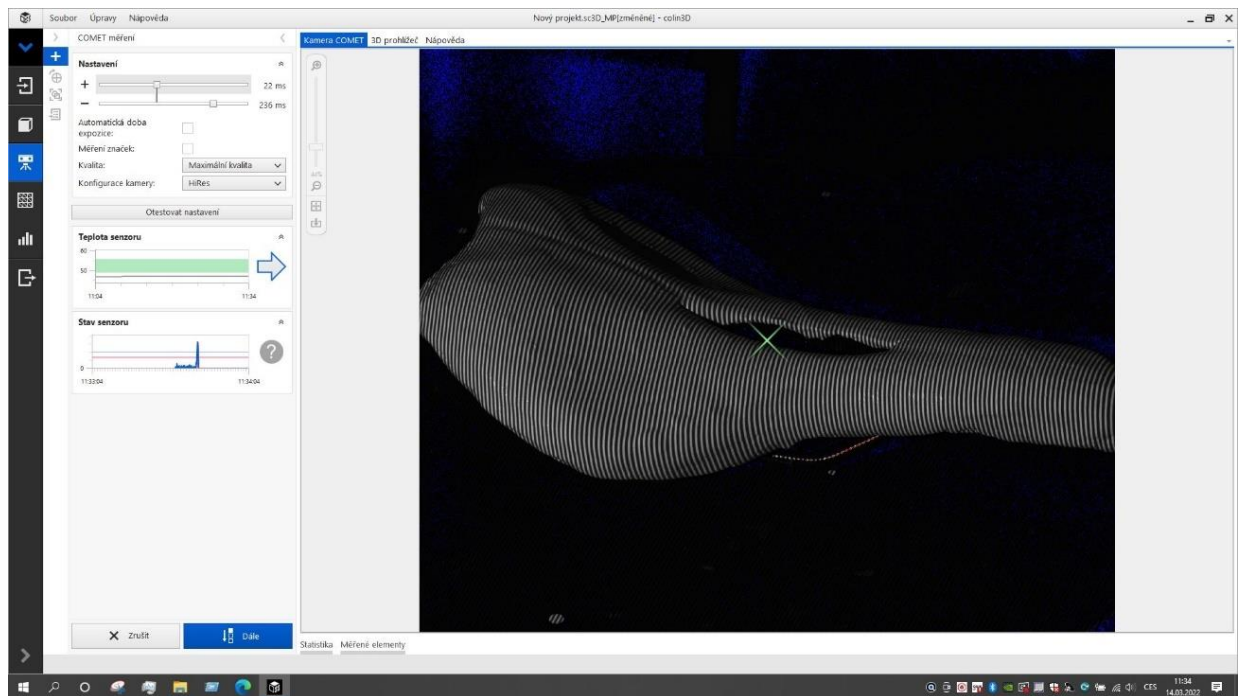
objektivu byla velikost měřicího pole 255 x 211 x 140 mm. Součástí skeneru je otočný stůl, na který lze otisk umístit a naskenovat jej v předem definovaných polohách. Celou sestavu i s otiskem lze vidět na Obrázek 40.



Obrázek 40: Skener Comet

Pro práci se skenerem byl využíván software colin3D, který je stejně jako skener Comet produktem firmy ZEISS.

Po vložení skenovaného předmětu na stolek je nutné zvolit vhodnou expozici. Ta může být nastavena automaticky, nebo manuálně, které lze vidět na Obrázek 41. V hlavním poli screenshotu se nachází otisk, u kterého je expozice správně nastavena. Na příliš lesklých površích by se v případě přeexponování objevovala červená pole. V případě nízké expozice by skenovaný předmět nebyl na kameře vidět.

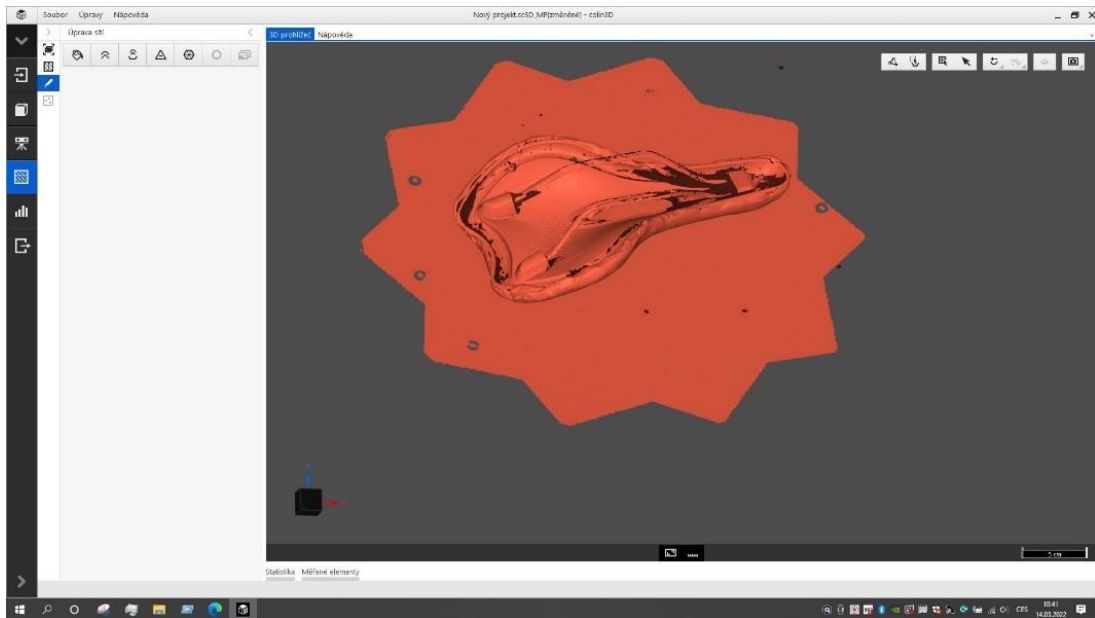


Obrázek 41: Otisk v pohledu kamery skeneru

Dalším krokem je nastavení počtu snímků. V tomto případě bylo zvoleno 15 měření (snímků). To znamená, že stolek se vždy pootáčí po 24 stupních, aby byl vytvořen snímek.

Tento postup byl aplikován dvakrát – na spodní i svrchní stranu otisku. Skenování muselo být prováděno ve dvou polohách, protože to byla nejjednodušší možnost, jak naskenovat celý otisk. Po naskenování druhé strany je nutné oba skeny spojit. Software má možnost spojení provést automaticky, ne vždy tato funkce pracuje správně. Proto je třeba na každém skenu označit alespoň dva body, které se vyskytují na obou naskenovaných částech.

Jak lze vidět na Obrázek 42, skener snímá i plochu otočného stolu. Ta se dá ale jednoduše v softwaru oříznout.



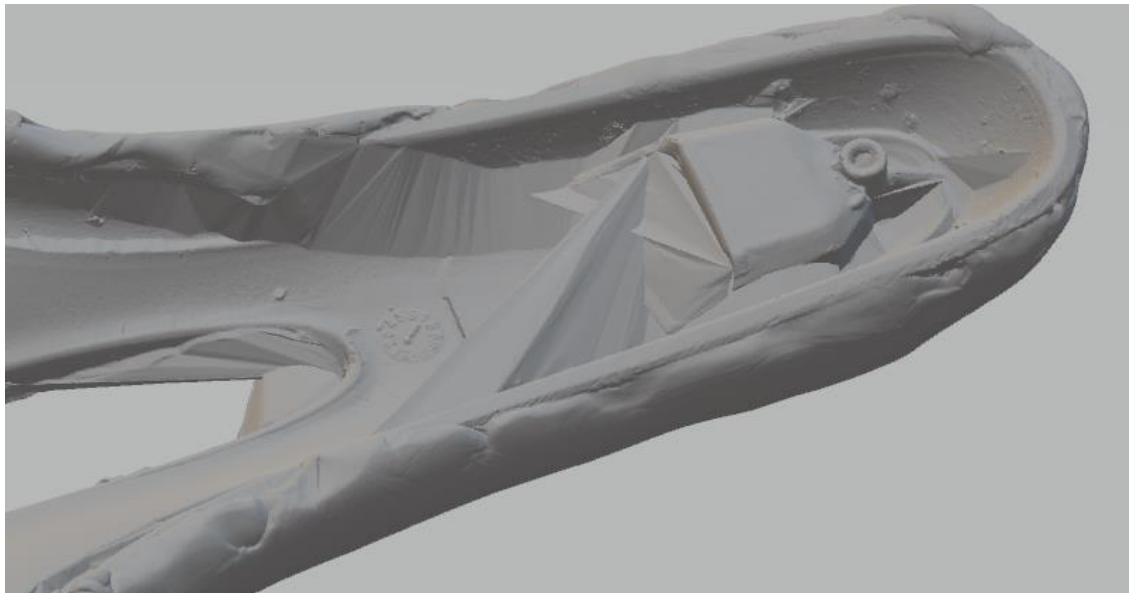
Obrázek 42: Sken spodní strany otisku

Dalším jevem, který lze v detailu sledovat i na Obrázek 43 jsou díry v modelu. Ty vznikají v místech, kde byly odstíněny promítané proužky, nebo kde byl povrch lesklý a nebylo možné proužky správně nasnímat. Software colin3D umožňuje tyto díry automaticky vyplnit tak, aby získaná trojúhelníková síť byla úplná. Softwarové vyplnění děr je možné kombinovat s následným doskenováním objektu. Automatické vyplnění se vyplatí nejvíce u malých děr, kde jsou výpočty softwaru přesné a více či méně se shodují s realitou. U velkých děr je lepší naskenovat předmět v jiné poloze, protože s větší plochou díry v síti se zvyšuje odchylka od reality.



*Obrázek 43: Díry v modelu*

Výsledek vyplňování děr lze vidět na Obrázek 44. I v tomto případě není tvar dopočítaný softwarem ideální, ale protože tato strana dílu nebude v dalším postupu vyžadovat vysokou kvalitu, tyto tvary nijak nevadí.



*Obrázek 44: Zaplněné díry v modelu*

Stejným způsobem jako otisk byla naskenována i holá plastová deska. Svrchní část modelu desky bude v dalším postupu digitálně otisknuta do spodní strany modelu otisku s modelínou. Tím by mělo být zaručeno to, že až bude vytištěna

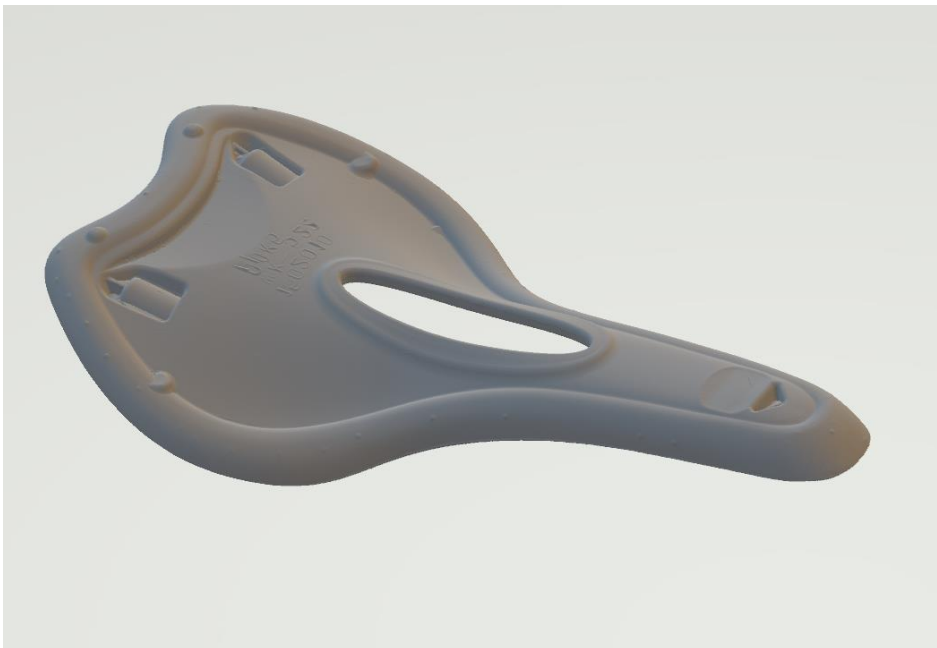


výsledná stélka, budou její rozměry korespondovat s deskou, na kterou bude nalepena.

Posledním krokem v programu colin3D byl export modelu. Výstupy lze vidět na Obrázek 45 a Obrázek 46. Tyto modely byly exportovány ve formátu STL. Jak je popsáno výše, jedná se o „duté modely“, které je potřeba převést na parametrické, aby bylo možné je upravovat v CAD softwarech.



Obrázek 45: Model sedla s modelínou

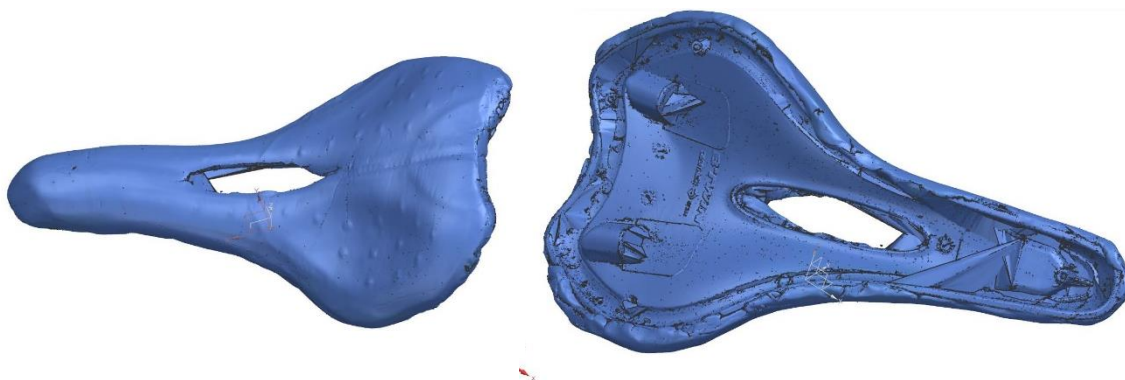


Obrázek 46: Model nosné desky

## 5.4 Příprava dat pro aditivní výrobu

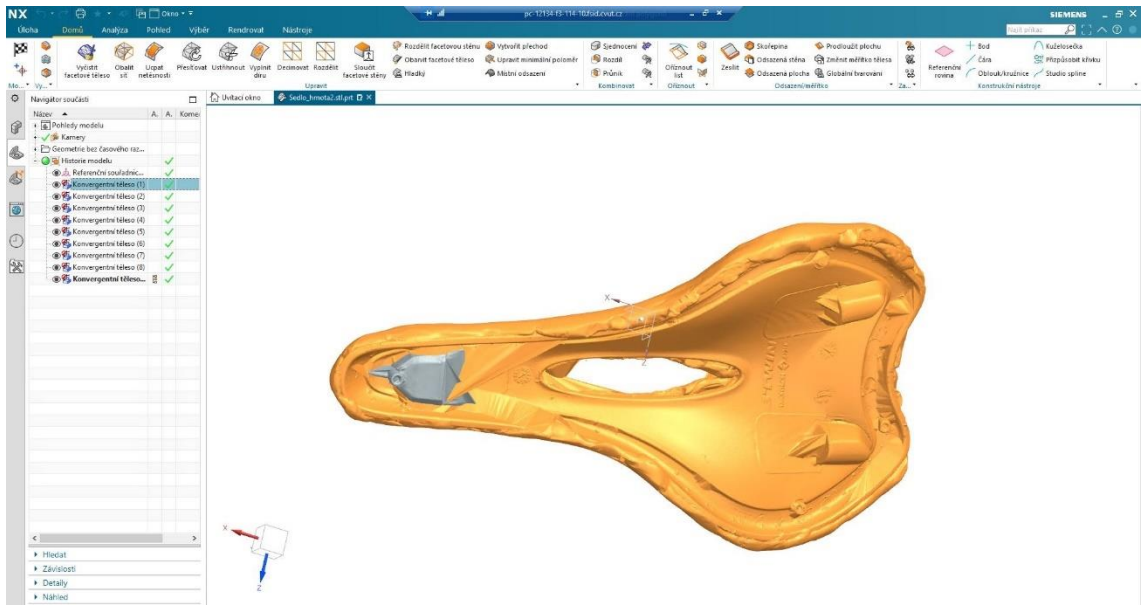
Protože otisk byl naskenován s velmi vysokou kvalitou, byl soubor pro zpracování dost velký, zachycoval i celou řadu detailů v řádu okolo desetin mm, které se nebudou dále vyrábět a navíc je jezdec na kole ani nepozná. Mimo jiné to vedlo i k tomu, že soubor byl velký a že se osobní počítač používaný pro práci s modelem sekal a programy velice často padaly. K vyhlazení sítě byl použit software Siemens NX, který disponuje funkcí „Vyhladit“.

Naimportovaný model lze vidět na Obrázek 47. Z obrázku je patrné, že modely jsou velmi detailní. To je sice známka toho, že skenování bylo provedené kvalitně, ale pro výrobu sedla, kde nebude kladen důkaz na malé tolerance, není potřeba vysoká přesnost a při práci by byla spíše na obtíž. Na obou stranách modelu je patrné velké množství přehybů a nepřesností.



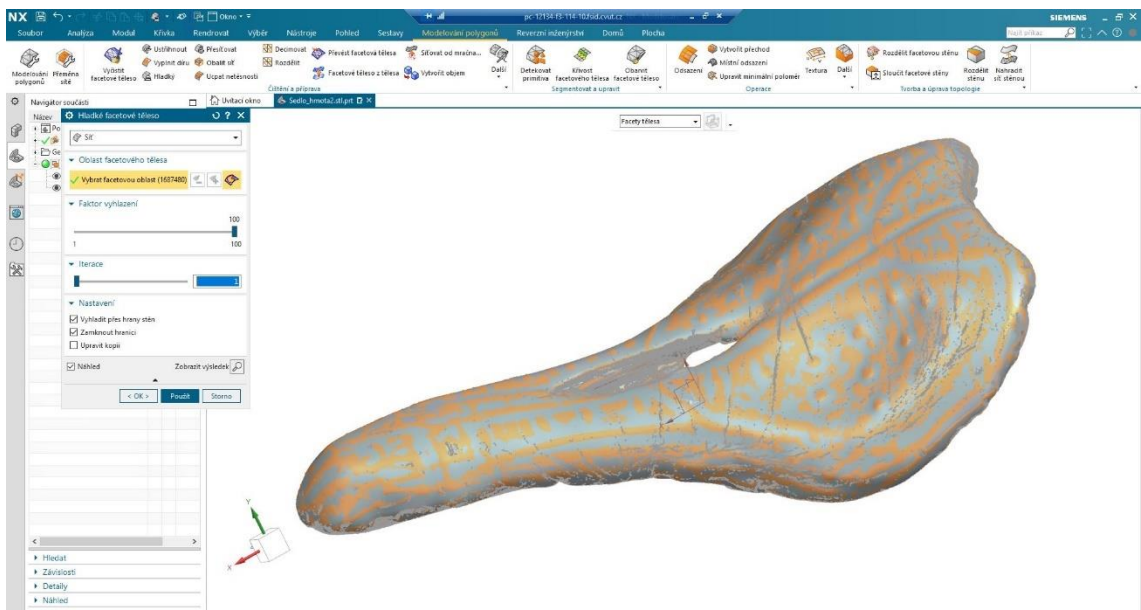
Obrázek 47: Model importovaný do NX

Protože povrch modelu je velmi členitý, je možné, že se stalo to, že byla naskenována určitá část, která je od samotného modelu oddělena jako jiné těleso. Z tohoto důvodu byla využita funkce „Modelování polygonů“, kdy software zobrazil, kolik se skutečně v souboru nachází těles. Výsledek tohoto kroku je zobrazen na Obrázek 48. Jak je vidět, Software vnímá např. i přední část desky jako jiné těleso. Ostatní nalezená tělesa nebyla ani na první pohled vidět a označená část desky netvořila zásadní část modelu, a proto byla nadbytečná tělesa odstraněna a ponechána jen největší část.



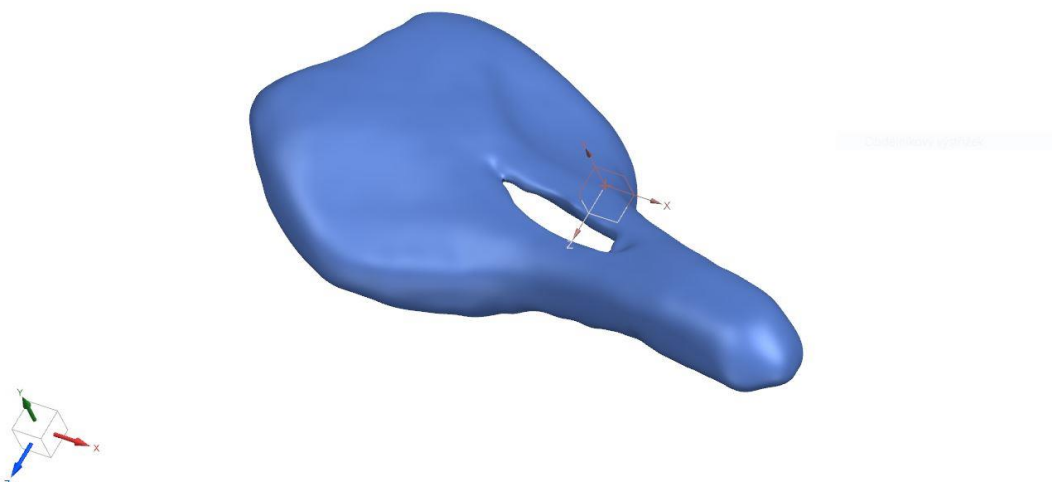
Obrázek 48: Modelování polygonů

Po tomto kroku už následovalo samotné vyhlazení. Je nutné zde podotknout, že v tomto kroku nebylo nutné zachovat detailní tvar povrchu modelu. Jediné, čeho bylo nutné dosáhnout bylo zachování „reliéfu“ svrchní strany budoucího sedla. Je dobré opět připomenout, že odchylky v rámci desetin milimetrů nebudou mít na funkci ergonomického sedla vliv.



Obrázek 49: Funkce Vyhladit

Faktor vyhlazení byl nastaven postupným procesem na hodnotu Faktor 100. Obrázek 49 ukazuje, že pro vyhlazení bylo vybráno celé těleso a ne pouze určité facety (trojúhelníky vzniklé propojením naskenovaných bodů), ze kterých se model skládá. Výběr jednotlivých facet je samozřejmě v softwaru také možný. Výsledný model lze pozorovat na Obrázek 50 a konečný model lze hodnotit jako zdařilý.



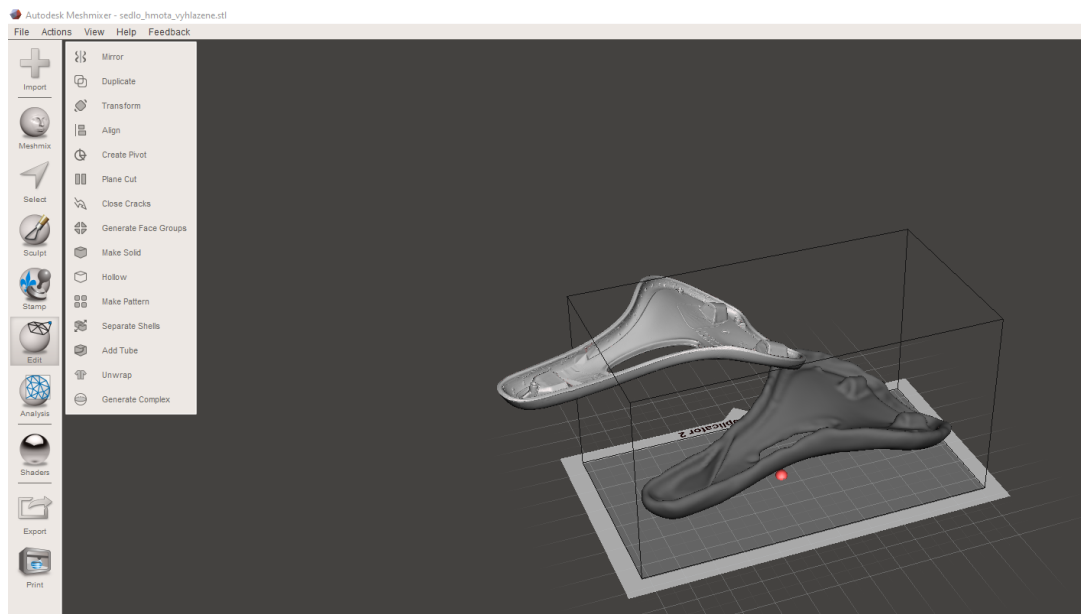
Obrázek 50: Vyhlazené těleso

Další postup je zvolen s ohledem na to, jaký typ výroby bude následovat a jakým způsobem bude vyráběn. Obvyklým, výše zmíněným postupem, by bylo model parametrizovat, ale protože bude vyráběn pouze jeden kus a navíc vyráběn 3D tiskem, kdy jsou vstupní data ve formátu stl, nemusí se parametrizace provádět a dostačující bude upravovat stl soubor pomocí softwaru Autodesk Meshmixer, který je právě pro úpravu stl modelů vytvořen.

Dalším krokem ve výrobě ergonomického sedla bylo vymodelovat spodní povrch otisku tak, aby přiléhal na svrchní část desky a bylo ho tedy jednoduché přilepit. Toto bylo provedeno v softwaru Meshmixer. Zjednodušeně řečeno, bylo potřeba elektronicky otisknout model desky do vyhlazeného otisku.

Do softwaru Meshmixer byl tedy importován vyhlazený otisk a naskenovaná deska. Protože bude přetvářen model otisku, bylo třeba přes funkci EDIT a následně MAKE SOLID udělat z dutého stl tělesa tělo objemové. Na Obrázek

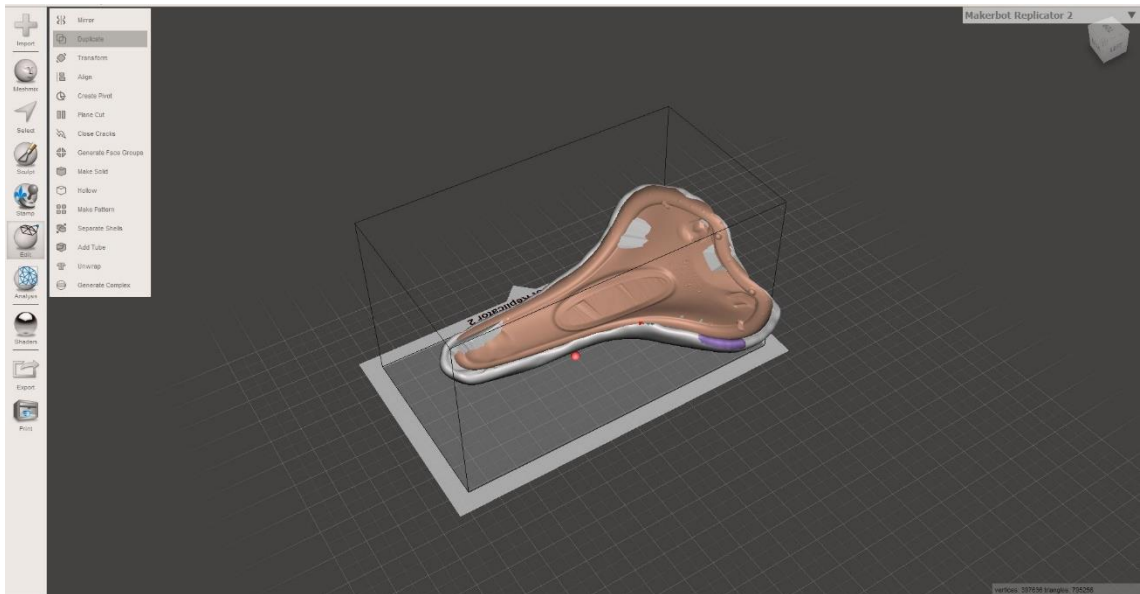
51 Ize vidět obě naimprotovaná tělesa a taky to, že otisk se po převodu na SOLID nijak nezdeformoval ani nepoškodil.



Obrázek 51: Importovaná tělesa v Meshmixeru

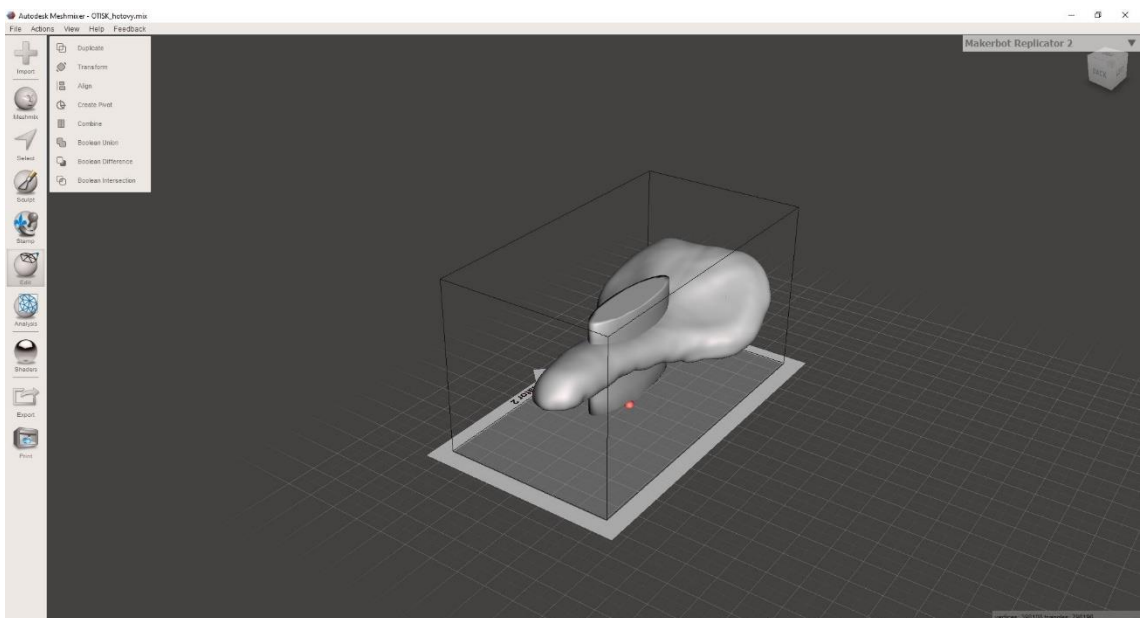
Jako další krok následovalo zarovnání těles k sobě tak, jako když byla na desku nanesena reálná modelína, do které se dělal otisk. Zarovnávání bylo zjednodušeno tím, že se dalo „chytit“ dvou výstupků, kde v reálném dílu slouží jako pouzdra pro dráty pro upevnění sedla na spodní straně desky.

Otisknutí je následně velmi jednoduché. Po vyrovnání je potřeba držet klávesu Shift a levým tlačítkem myši vybrat obě tělesa. Poté se objeví nabídka pro operaci se dvěma tělesy, z nichž se vybere funkce BOOLEAN DIFERENCE a dále se určí, který model se bude tvarovat a který zmizí. Výsledek lze vidět na Obrázek 52.

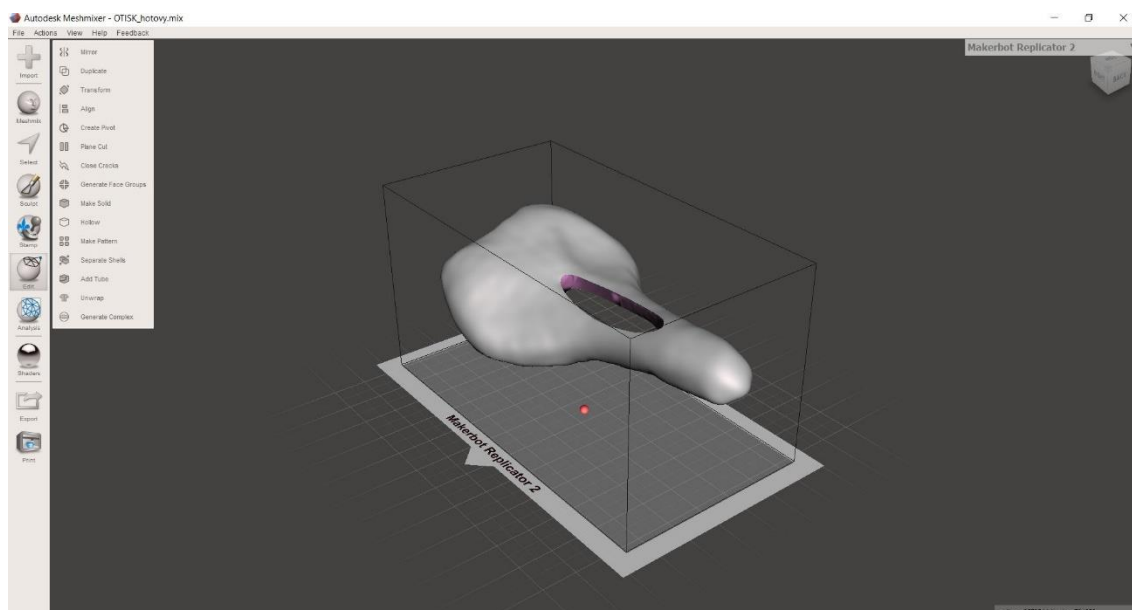


Obrázek 52: Elektronický otisk desky do modelu sedla

Po otisknutí desky se vyplnila díra, která byla v původní desce. Tato díra musela být tedy v dalším kroku opět vytvořena. Opět k tomu byla použita funkce BOOLEAN DIFFERENCE a to tím stylem, že byl vygenerován válec a následně upraven tak, aby po provedení funkce BOOLEAN DIFFERENCE vznikla díra optimálního tvaru. Postup lze vidět na Obrázek 53 a Obrázek 54.



Obrázek 53: Upravený válec



Obrázek 54: Díra v modelu

Po vyřešení díry bylo dalším krokem v úpravě modelu opravení míst okolo krajů desky, kde se nacházejí nepravidelné a nevzhledné převisy modelíny. V detailu lze tuto oblast vidět na Obrázek 55, kde jsou vidět i vady uprostřed desky, které budou opraveny později.

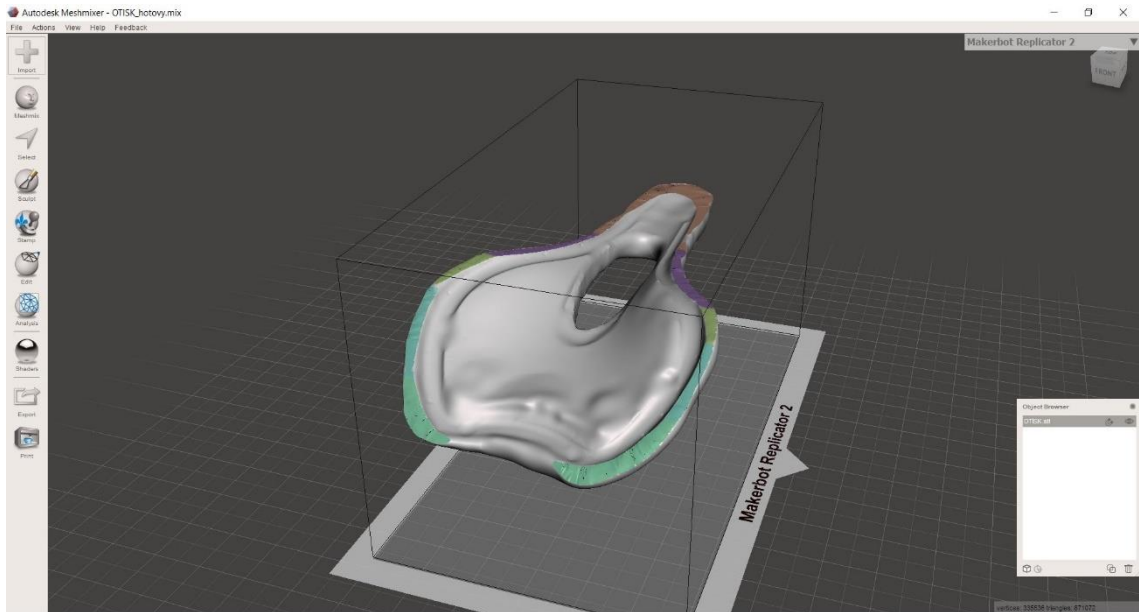
Díra má v sedle dvě funkce. Každý by nejspíše řekl, že hlavní je zajištění pohodlí cyklisty, který si díky přítomnosti díry při delší jízdě neotlačí partie na tuto část sedla přiléhající, ale hlavní je ta, že materiál sedla pod jezdcem pruží, deformuje se a více či méně se přizpůsobuje zadku jezdce. Když je v sedle díra, znamená to, že materiál má větší prostor k pohybu a může se tak lépe přizpůsobit jezdci. Proto je potřeba díru uprostřed sedla vytvořit.



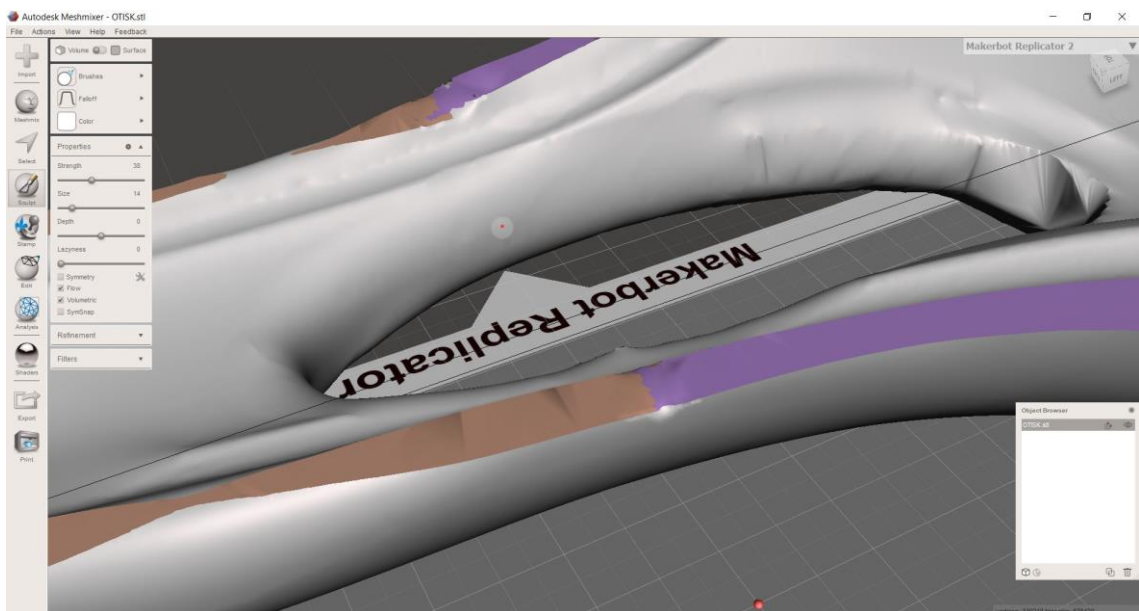




Jak je vidět podle barev na Obrázek 57 a Obrázek 58, celkem bylo použito pět kvádrů, aby vzniklé plošky svíraly co možná nejtupější úhly, které budou vyhlazeny později. Tímto krokem prozatím skončila práce v Meshmixeru, ale tento software bude v dalším postupu ještě použit.



Obrázek 57: Výsledek zarovnání převisů

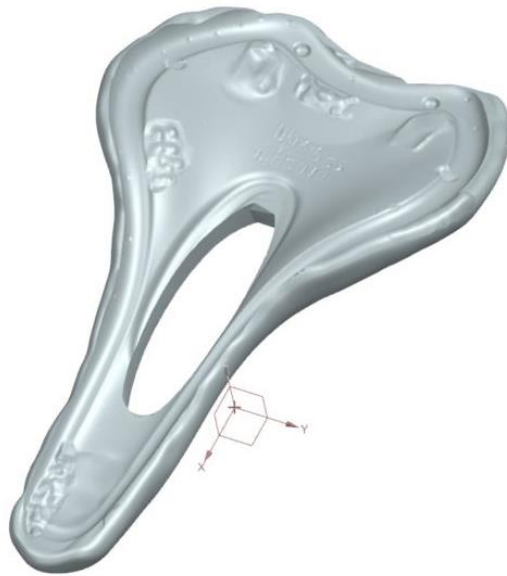


Obrázek 58: Detail přechodu mezi ploškami

Podruhé během postupu úpravy naskenovaného sedla byl použit software Siemens NX. V této fázi byl použit na úpravu ostrých hran, které vznikly zarovnáváním spodní části modelu přikládáním kvádrů. Dále bylo třeba

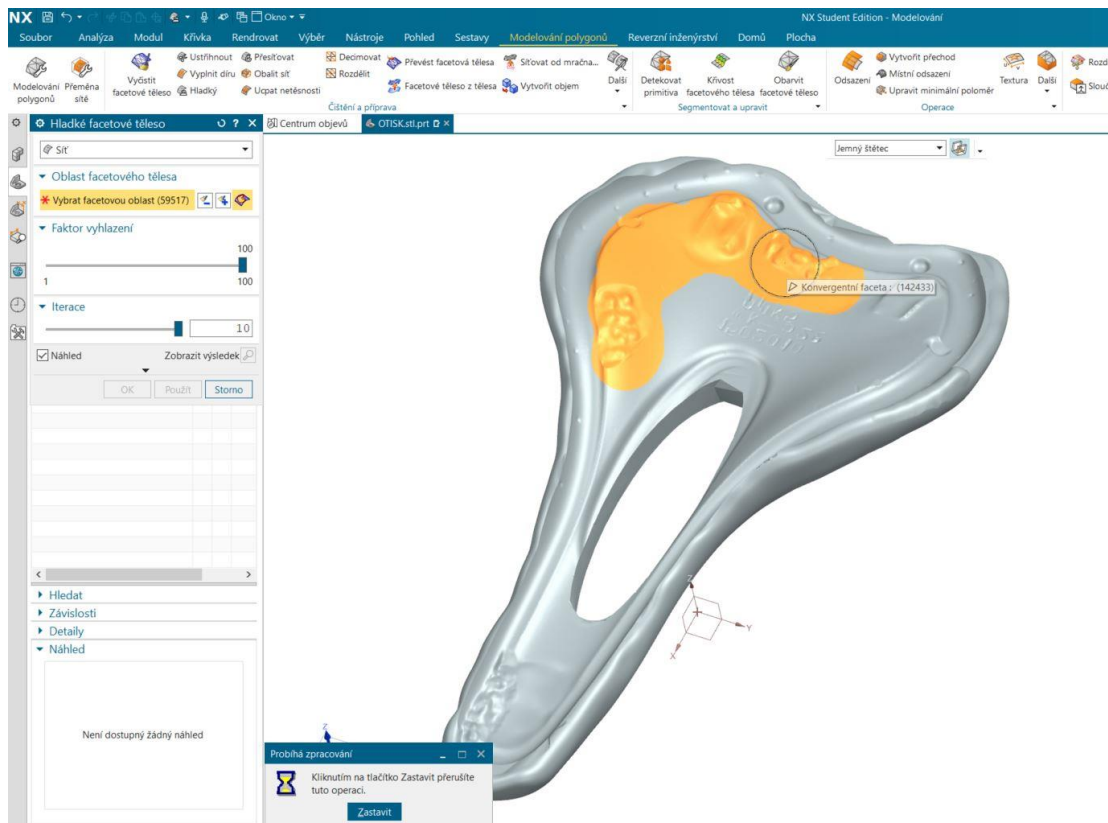
vyhladit drobné chyby vzniklé otisknutím desky do modelu sedla s modelínou a hranu okolo díry uprostřed sedla.

Model exportovaný z Meshmixeru byl tedy naimportován do softwaru NX. Jeho podobu lze vidět na Obrázek 59.



Obrázek 59: Model v NX

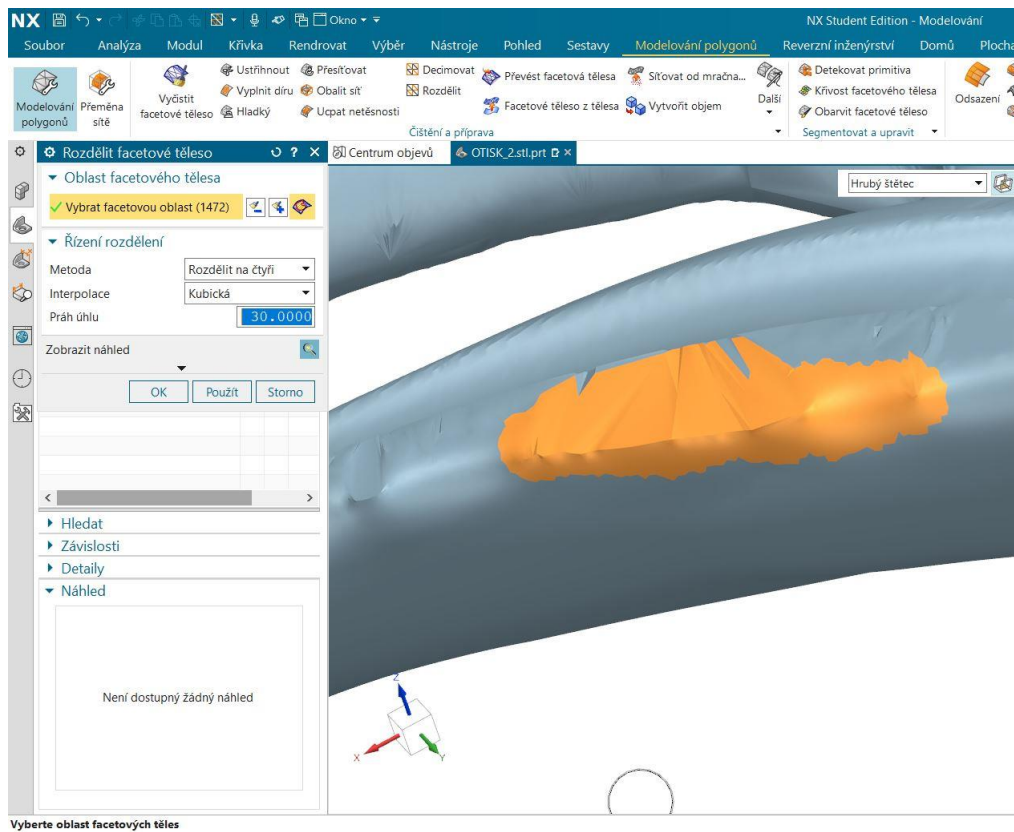
Po importu byla nejprve vyhlazena spodní strana modelu, kterou bude v reálu přilepen výtisk k desce. Využita byla opět funkce Vyhladit facetové těleso. Jak lze vidět na Obrázek 60, nebylo vybráno celé těleso, ale pouze spodní strana. K tomuto výběru byl použit nástroj Hrubý štětec a na detaily pak jemný štětec. Rozdíl mezi těmito dvěma nástroji pro výběr je následující. U obou nástrojů uživatel softwaru pohybuje kruhovým kurzorem. U jemného štětce se vyberou pouze ty trojúhelníky, které jsou celým obsahem uvnitř kruhového kurzoru. U Hrubého štětce dojde k označení i těch trojúhelníků, které do kurzoru zasahují pouze částí své plochy. Rozdíl mezi těmito nástroji je nejvíce znatelný při výběru malých plošek, které jsou složené z malého počtu trojúhelníků. Při výběru větších ploch uživatel rozdíl téměř nepozná.



Obrázek 60: Vyhlazení spodní strany modelu

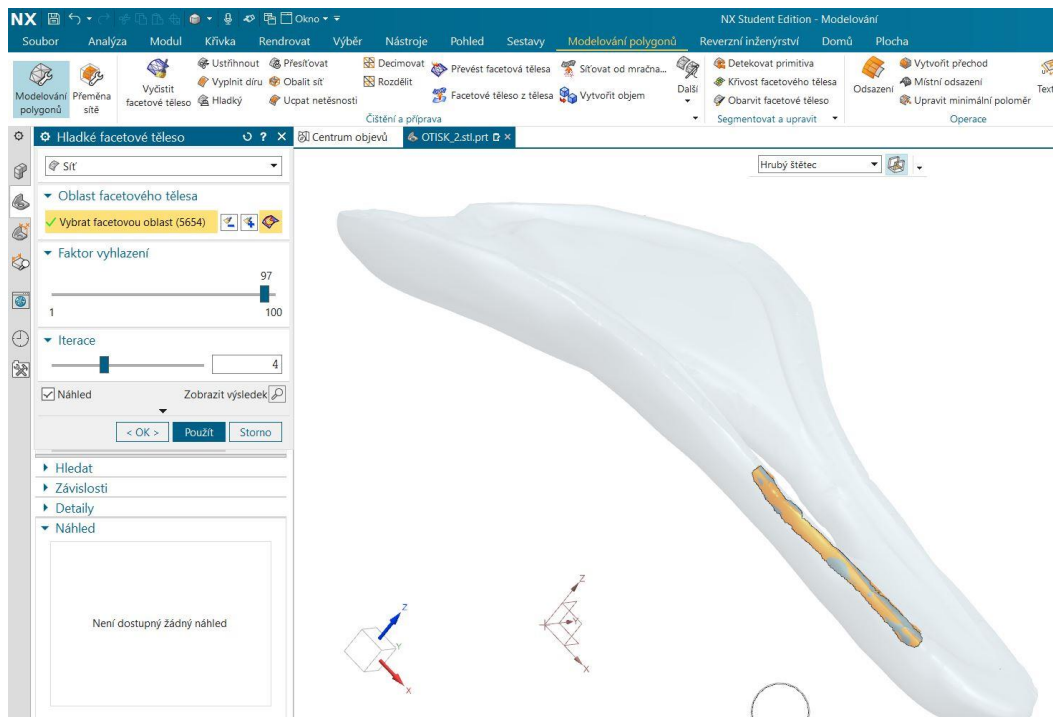
Deska byla tedy vyhlazena, ale bylo potřeba vyřešit ostré hrany, kdy se objevil další nečekaný problém. Když byl model upravován pomocí přikládání kvádrů, vznikaly rovinné plošky a jak by se asi dalo předpokládat, nevzniklo v těchto plochách moc trojúhelníků. To je dané tím, že rovina je definovaná třemi body a není tedy důvod, proč by Meshmixer generoval více bodů, než bylo potřeba. Z tohoto důvodu nebylo možné hrany nijak zvlášť upravovat a když, tak nebylo možné docílit požadovaných tvarů.

Na Obrázek 61 je vidět výběr jednotlivých trojúhelníků. Už z tohoto pohledu je jasné, že z tolika bodů zaoblená plocha vytvořit nepůjde. Pro tento problém má ale NX řešení. Pomocí funkce Rozdělit facetové těleso lze současně vybrané trojúhelníky rozdělit na více bodů a tím usnadnit tvorbu zaoblených ploch. Parametry pro rozdělení facet byly vybrány postupným zkoušením na: Práh úhlu – 30 a metoda – Rozdělit na čtyři.

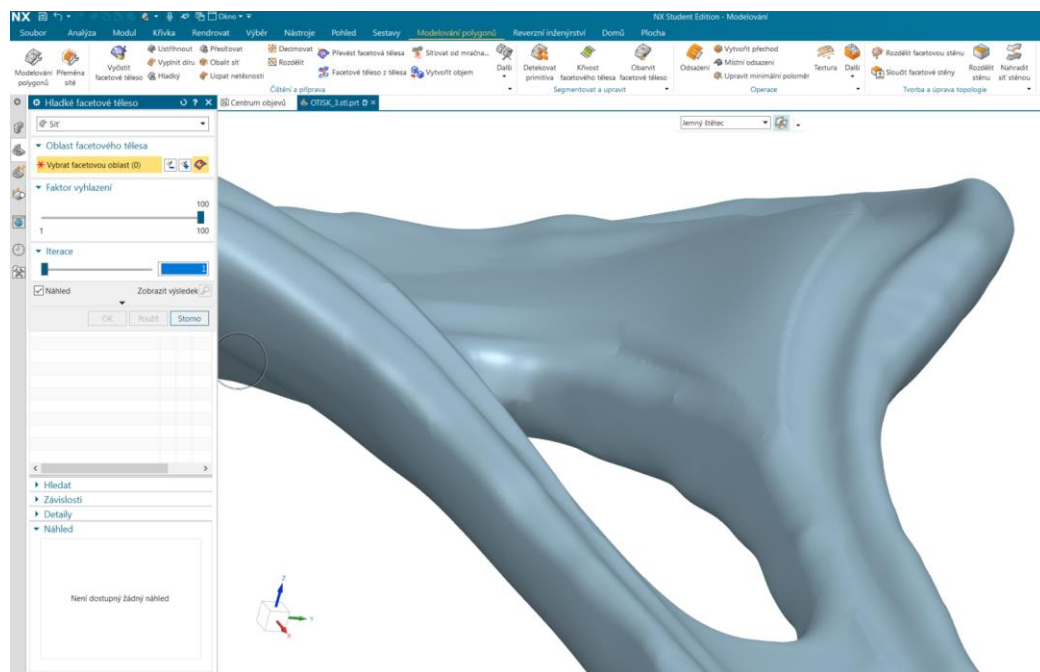


Obrázek 61: Rozdělování trojúhelníků

Následné vyhlazování lze vidět na Obrázek 62. Po rozdělení trojúhelníků již bylo vyhlazování bezproblémové. Postupně byly vybrány všechny plochy, které měly být vyhlazeny. Výsledek lze vidět na Obrázek 63. Je očividné, že model není pravidelný a místy se na něm vyskytují malinké nedokonalosti, které by však neměly mít vliv na funkci konečného výrobku. Spodní strana navíc nebude vidět a bude na ní nanášeno lepidlo. Hlavní požadavek, který je na ní kladen je ten, aby kopírovala vrchní stranu plastové desky a to by měla splňovat.



Obrázek 62: Vyhlazování hran

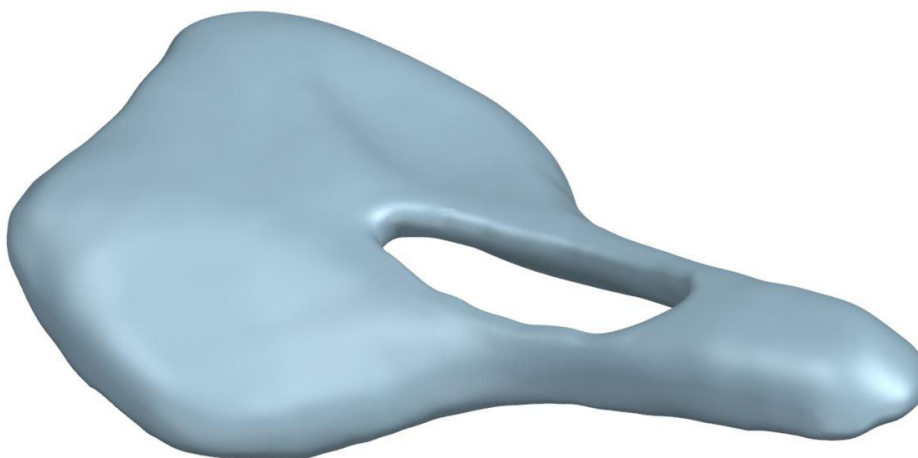


Obrázek 63: Detail zaoblených ploch

## 5.5 Zhodnocení modelu

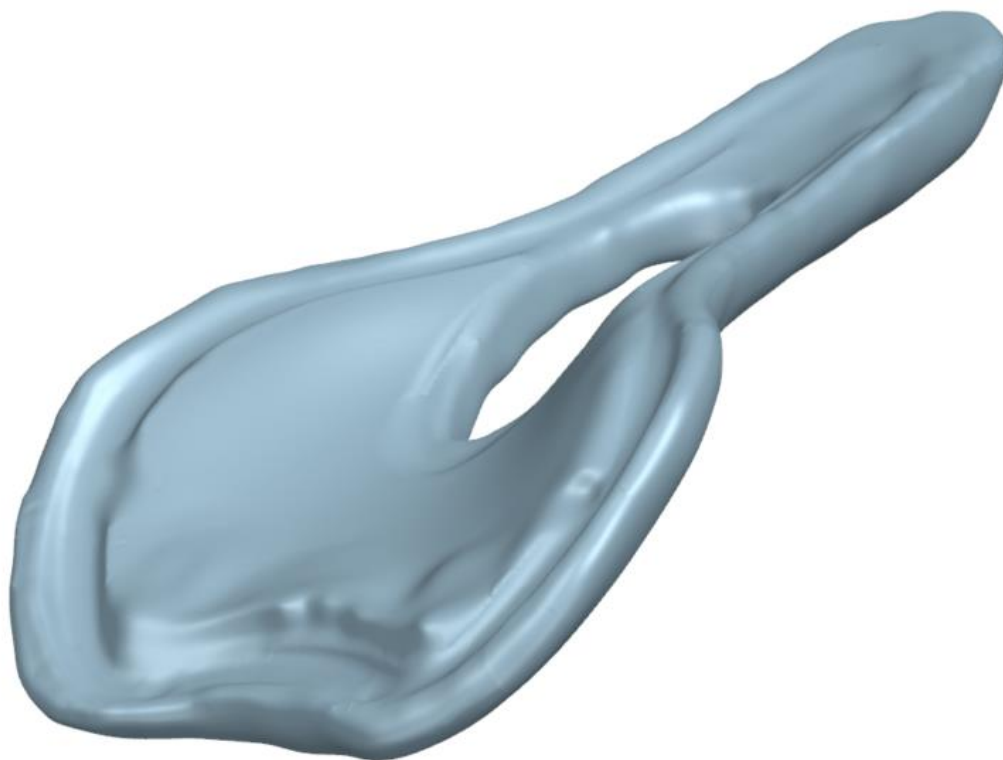
Vytvořený model lze vidět na Obrázek 64 a Obrázek 65. Při bližším prohlédnutí a vyhodnocení byl udělán závěr, že tento model je dostatečně kvalitní a vyhovující k tomu, aby na něm byla vytvořena odlehčená struktura. Kritériem hodnocení, zda je model povedený bylo zejména to, aby byl tvar vrchní strany hladký a zároveň si zachovával reliéf původního otisku vytvořeného z modelíny. Jak už bylo zmíněno výše, milimetrová odchylka od původního tvaru nebude při jízdě postřehnutelná. Dalším kritériem byla spodní strana, která by měla dobře sednout na plastovou desku, což se stoprocentně ověří až po vytisknutí modelu. Zvolený a provedený postup by neměl být chybný.

Dalším postupem bude vytvoření odlehčené (lattice) struktury a snaha napodobit 3D tištěná sedla zmíněná v teoretické části. Jako software pro vytvoření lattice struktury bude opět Autodesk Meshmixer, který v modelu nabízí vytvoření nejrůznějších struktur.



Obrázek 64: Vytvořený model otisku 1





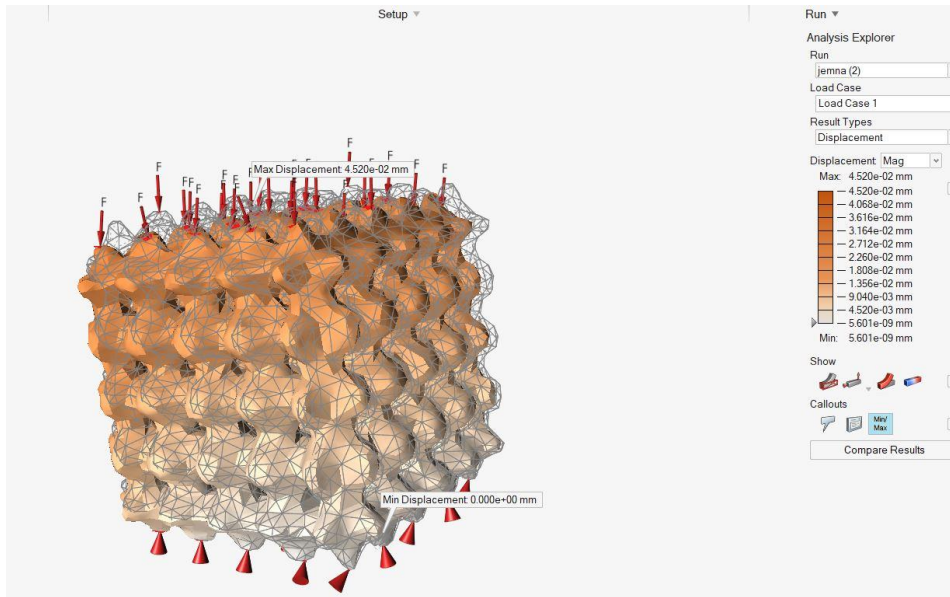
Obrázek 65: Vytvořený model otisku 3

## 5.6 Vytváření odlehčené struktury

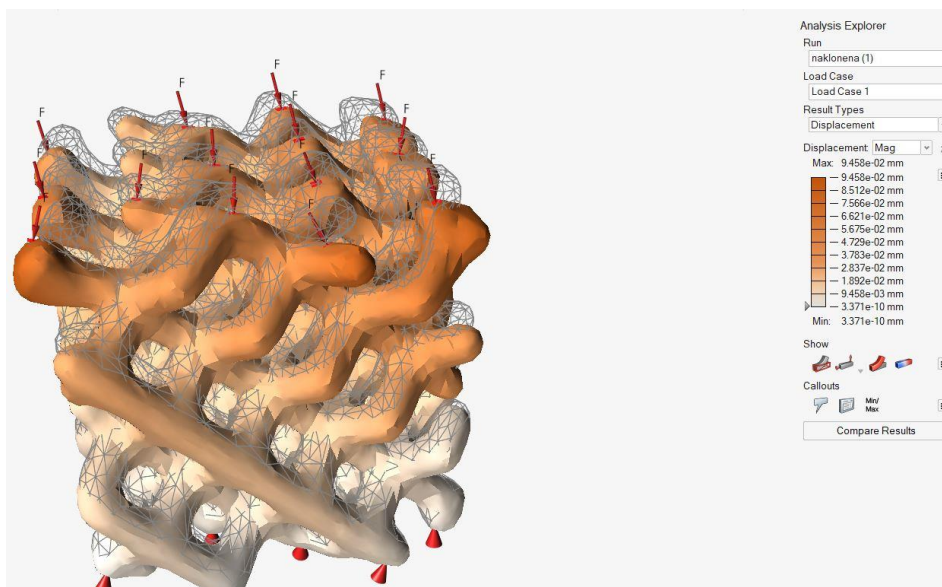
Software Meshmixer nabízí možnost tvorby odlehčené struktury. Dá se zde nastavovat tloušťka a vzdálenost jednotlivých segmentů. V případě výroby sedla ale záleží na tuhosti a deformaci finálního výrobku. Ta by podle zkušeností z běžně vyráběných a dostupných sedadel měla být při sezení v řádu jednotek milimetrů. Vzorek měl podobu krychle s danou strukturou o rozměrech 17 x 17 x 17 mm. Tyto rozměry byly vybrány proto, že přibližná průměrná tloušťka sedla je právě 17 mm a Meshmixer při menších vzorcích nebyl schopen vytvořit požadovanou strukturu. Ze sedací plochy sedla a hmotnosti jezdce, která je 100 Kg bylo dopočítáno, že na každý vzorek působí síla 45 N.

Pro představu, v jakých řádech bude skutečná deformace dané struktury, byly vytvořeny čtyři vzorky struktur, ze kterých budou následně vytvořené návrhy sedel. Tyto vzorky byly testovány v softwaru Altair Inspire. Tyto vzorky jsou zobrazeny na Obrázek 66, Obrázek 67, Obrázek 68, Obrázek 69. U každého

obrázku je stupnice s deformací. V této stupnici se hledělo na hodnoty, které nejsou extrémní a nacházejí se těsně pod povrchem. Pro hustou strukturu to tedy bylo okolo 0,02 mm, pro nakloněnou 0,04 mm, pro řídkou 0,06 mm a pro strukturu s šestistěnným vzorem 1 – 2 mm, což je hodnota, která by měla přibližně odpovídat deformaci běžně vyráběných sedel.

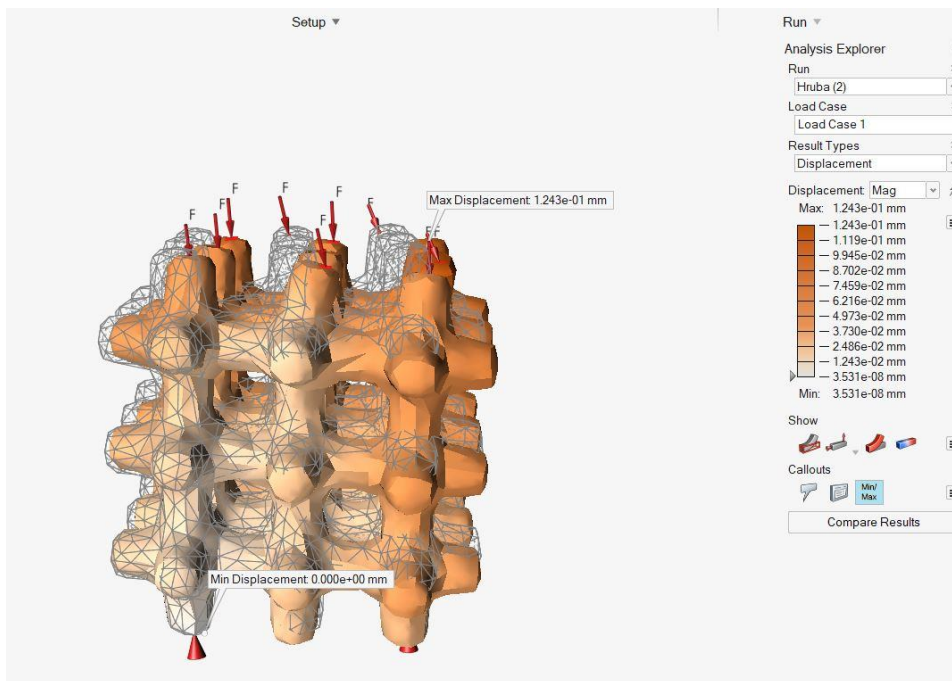


Obrázek 66: Hustá struktura

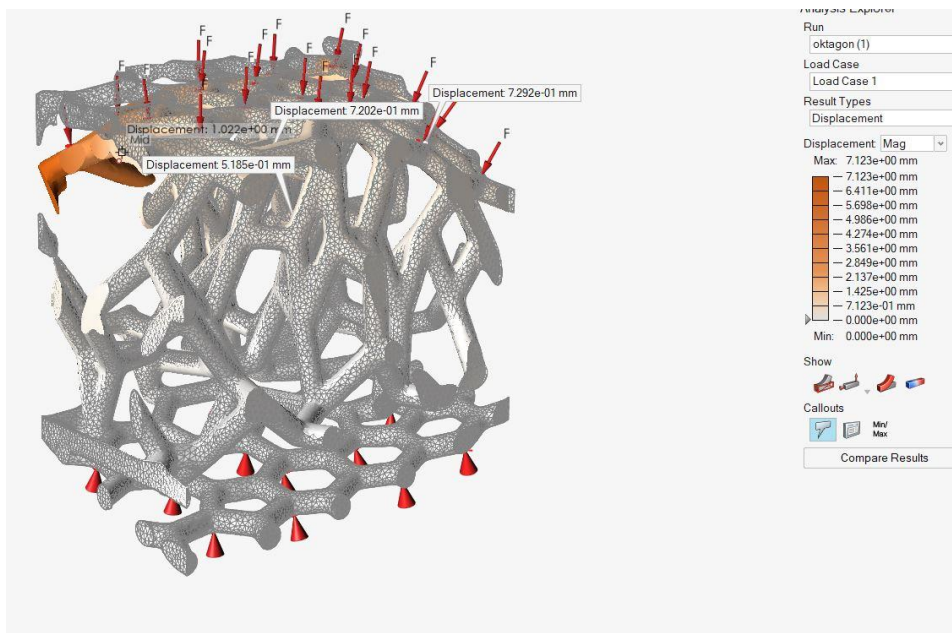


Obrázek 67: Nakloněná, řídká struktura





Obrázek 68: Řídká struktura



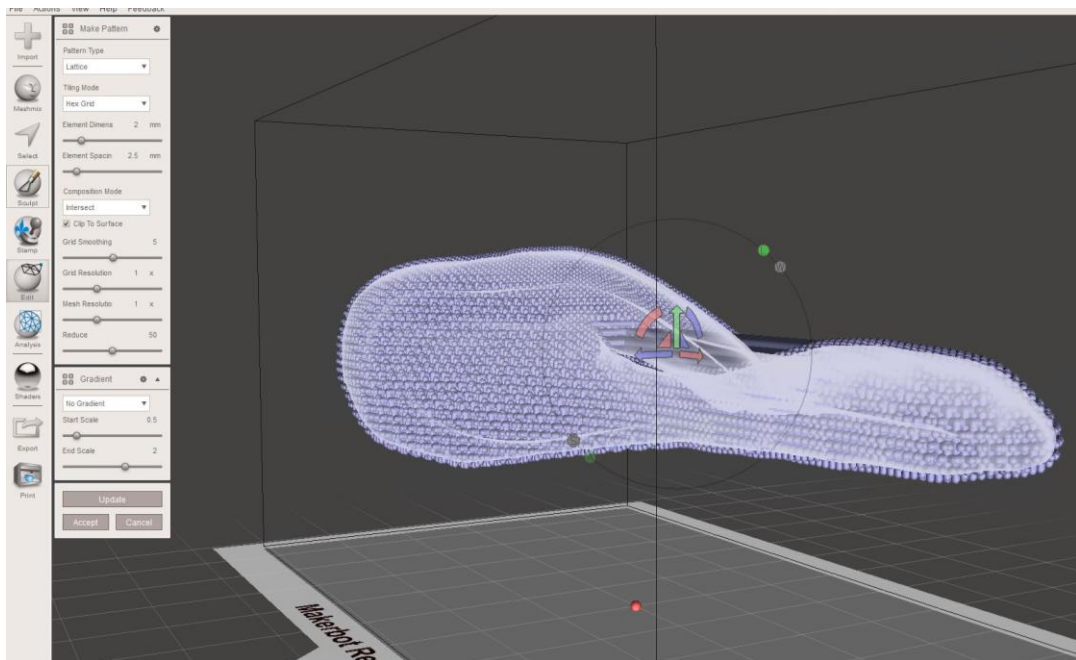
Obrázek 69: Struktura s šestistěnným vzorem

Je také třeba uvést, že vzorek se strukturou s šestistěnným povrchem byl vytvořen pomocí funkce Mesh + Delaunay Dual Edges. Ostatní varianty byly vytvořeny pomocí funkce lattice.

Jak bylo zmíněno výše, odlehčená struktura byla vytvářena pro zajištění prodyšnosti sedadla, redukci hmotnosti a výrobních nákladů. Na odlehčené

struktura lze také velmi dobře demonstrovat, co všechno je možné vytvořit aditivní technologií, a také kde a pokud vůbec má nějaké limity.

Prvním krokem, jako obvykle, bylo nainportování modelu do Softwaru. Po vložení modelu bylo nutné otevřít kartu Edit a dále funkci Make Pattern. Následně se otevřelo okno, kde bylo možné si vybrat typ struktury, kterou chce uživatel vytvořit, vedle odlehčené struktury je zde například vytvoření dutých otvorů v modelu, vytvoření zesíťování a mnoho dalších možností.

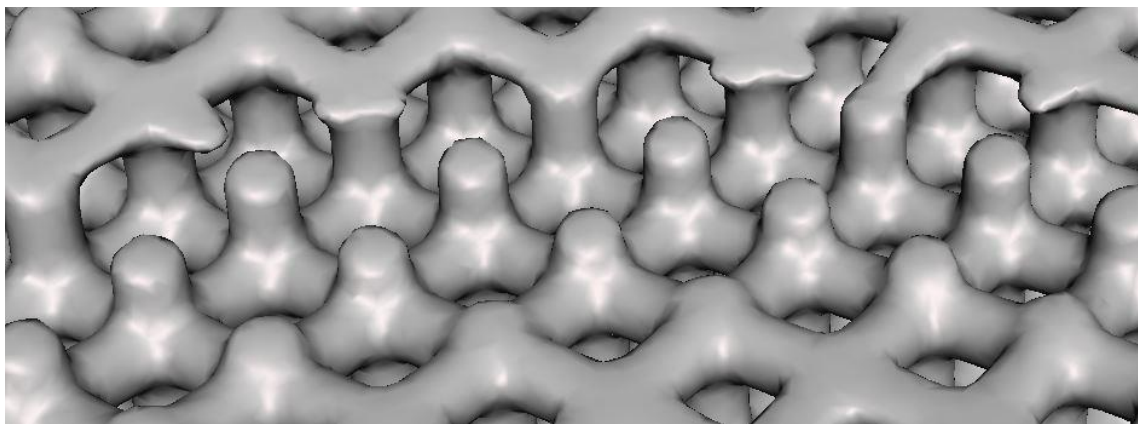


Obrázek 70: Tvorba odlehčené struktury

Pro náš případ byla tedy vybrána Lattice struktura. Důležité parametry, které byly nastavovány byly: Element Dimens (rozměr prvku), Element Spacin (Vzdálenost prvků), Grid Smoothing (Vyhlazení mřížky) a Reduce (Procento redukce). Nutno říci, že v modelu v hlavním okně software vykreslí předpokládanou podobu modelu podle zadaných parametrů. Tento jeho odhad je ale velmi často dosti vzdálený modelu, který vznikne, když Meshmixer podle zadaných parametrů opravdu model propočítá a vytvoří. Z tohoto důvodu vzniklo mnoho modelů s různými parametry, z nichž se vybíraly ty, které se zdály nejpodařenější a které budou nejvíce funkční. Toto nejspíše souvisí s tím, že se jedná o značně náročnou operaci na výpočetní techniku a běžný notebook s 8GB RAM a procesorem Intel Core i5 nemá šanci model

s lattice strukturou vytvořit. Pro tvorbu těchto odlehčených modelů byl použitý počítač s 32 GB RAM a i přesto tvorba jednoho modelu trvala okolo deseti minut a při nastavení velmi jemné struktury i na tomto počítači program spadl.

Protože program nabízí velký rozsah parametrů odlehčené struktury, bylo vytvořeno více variant modelů s lattice strukturou, než kolik bylo testováno. Na těchto modelech se začaly objevovat trendy, které na ergonomickém sedle nikdo nechce, jako je vidět na Obrázek 71, kde se vyskytují volné piny, které by mohly iniciovat vznik trhliny a zároveň způsobovat značné nepohodlí při jízdě.

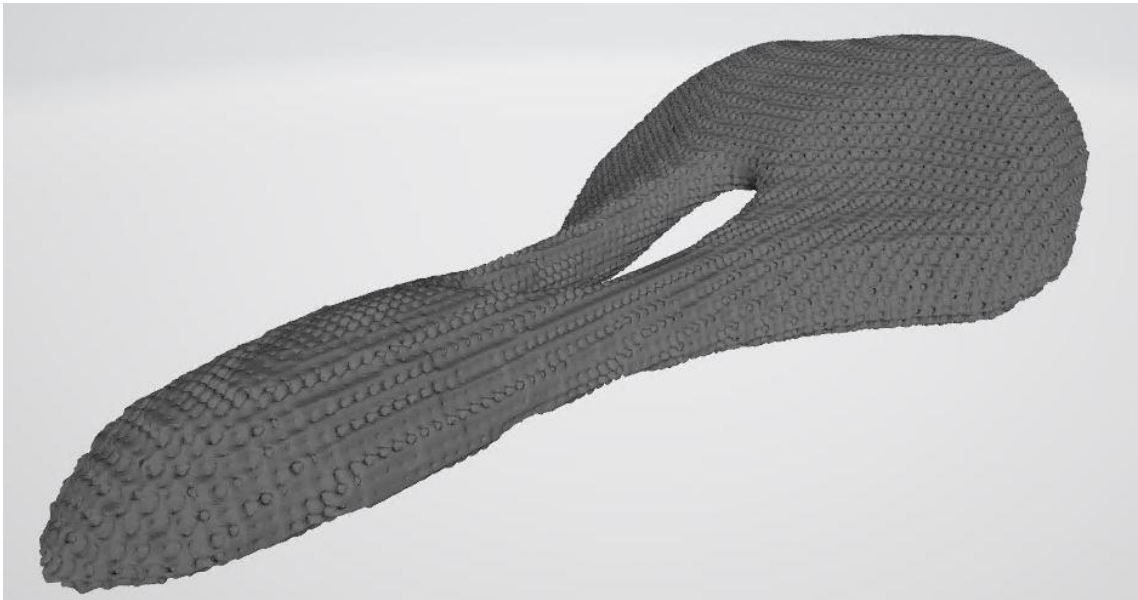


*Obrázek 71: Volné piny*

Na následujících obrázcích lze vidět výběr z vytvořených modelů. Jak bylo již bylo zmíněno výše, program po zadání parametrů nevytvářel přesně takové struktury, jaké vykresloval v předběžném náhledu. Parametry byly tedy vybírány spíše podle citu a podle již vytvořených modelů než podle tvrdých čísel. Lze ale říci, že se podařilo vytvořit reprezentativní vzorek variant, na kterých lze vidět všechny možné trendy, které se při tvorbě modelů objevovaly. Jsou jimi zejména volné piny, necelistvý a hrboletý povrch a nedostatečné odlehčení, což se poznalo tím, že skrz model nebylo vidět. Nutno říci, že nejvhodnější model je jakousi kombinací kompromisů každého z výše uvedených trendů. Je to proto, že tyto vlastnosti jdou ruku v ruce a například čím celistvější povrch je, tím méně dojde k odlehčení a v modelu jsou jen povrchové vruby. Když dojde k velkému odlehčení, vznikají na povrchu zase útvary, které by mohly iniciovat vznik trhliny a znehodnocení výrobku.

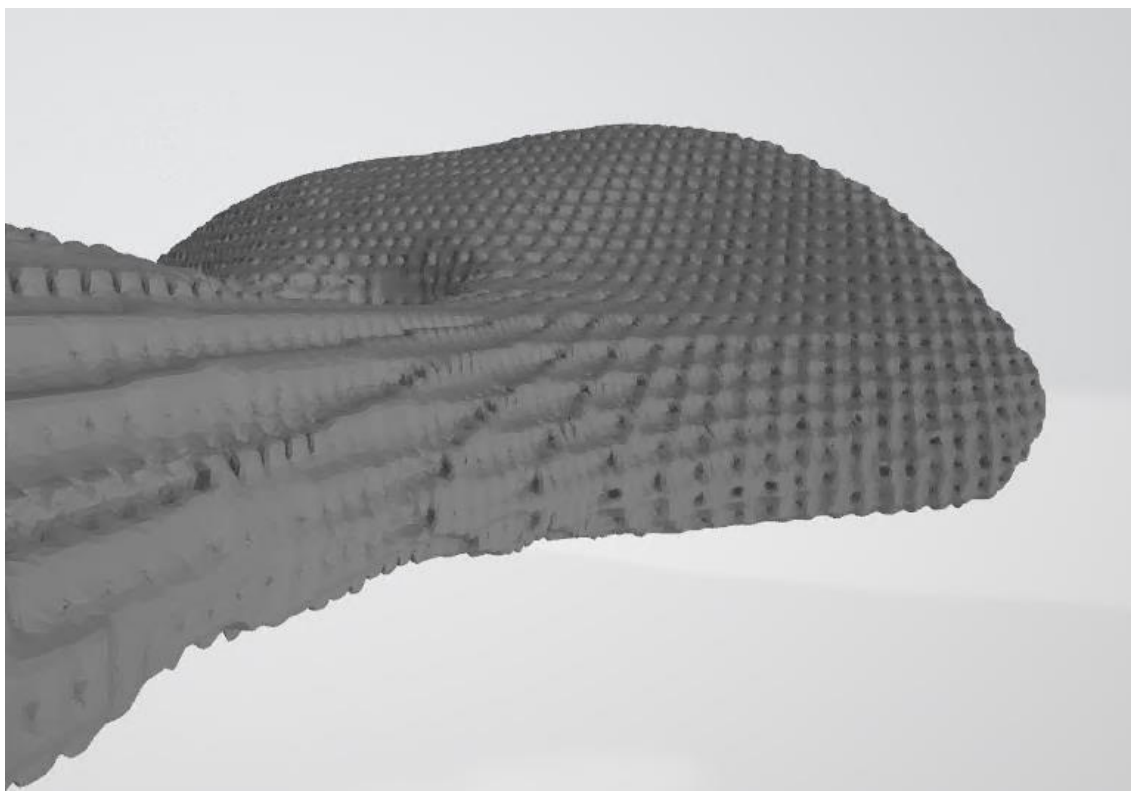
### 5.6.1.1 Model 1

Model 1, zobrazený na Obrázek 72 a Obrázek 73 je ten případ, kdy povrch by byl ideální a nelze na něm nalézt mnoho útvarů, ve kterých by mohla vzniknout trhlinka. Také by bylo pohodlné na něm sedět, protože je relativně hladký a plný materiál by zaručil dostatečnou oporu. Nevýhodou je, že nedošlo téměř k žádnému odlehčení.



*Obrázek 72: Model 1*

V detailu na Obrázek 73 je vidět, že materiál je více méně plný a výroba aditivní technologií by byla zbytečná a vyrobené sedlo by bylo velmi těžké.



Obrázek 73: Detail modelu 1

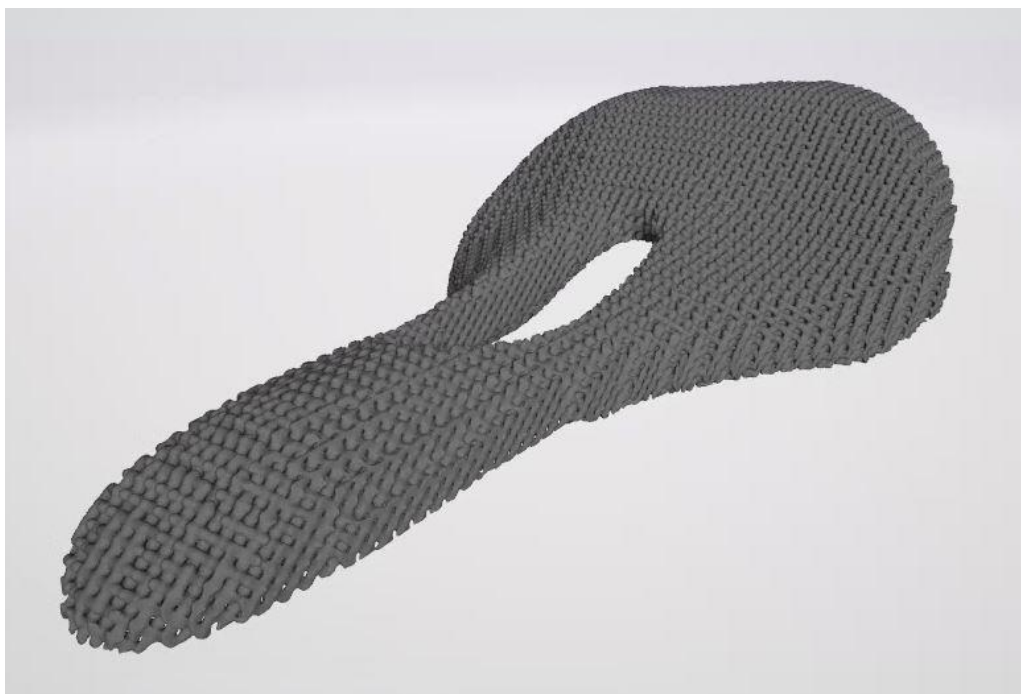
V Tabulka 1 jsou uvedeny nastavené parametry. Je třeba říci, že rozměr element 2 mm je velmi malá hodnota a asi není důvod se divit, že nedošlo k odlehčení.

Tabulka 1: Parametry modelu 1

Model 1	
Element Dimens [mm]	2
Element Spacin [mm]	2
Grid Smoothing	4
Reduce [%]	50

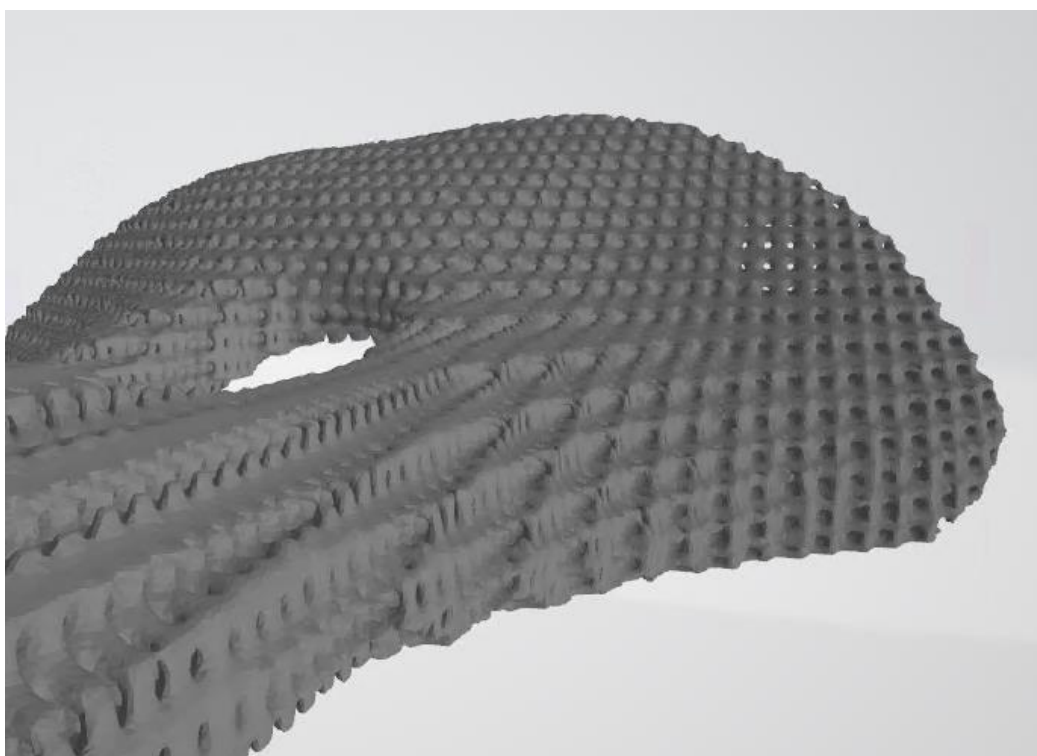
### 5.6.1.2 Model 2

Tento model vypadá lépe než Model 1. Z Obrázek 74 je patrné značné odlehčení a povrch se zdá stále hladký. I když v oblasti, kde dochází ke styku s pohybujícími se stehny cyklisty se vyskytují útvary, které by mohly zapříčinit vznik trhlin.



Obrázek 74: Model 2

Na Obrázek 75 je jasně vidět, že model je odlehčený a jeho objem je plný dutin. Ve spodních oblastech sedla jsou ale výstupy, které by se mohly při jízdě začít zatrhávat.



Obrázek 75: Detail modelu 2



V Tabulka 2 je vidět, že byla zvětšena vzdálenost elementů, což zapříčinilo větší odlehčení. Také Procento redukce bylo vyšší a tento model by měl být tedy lehčí než model první.

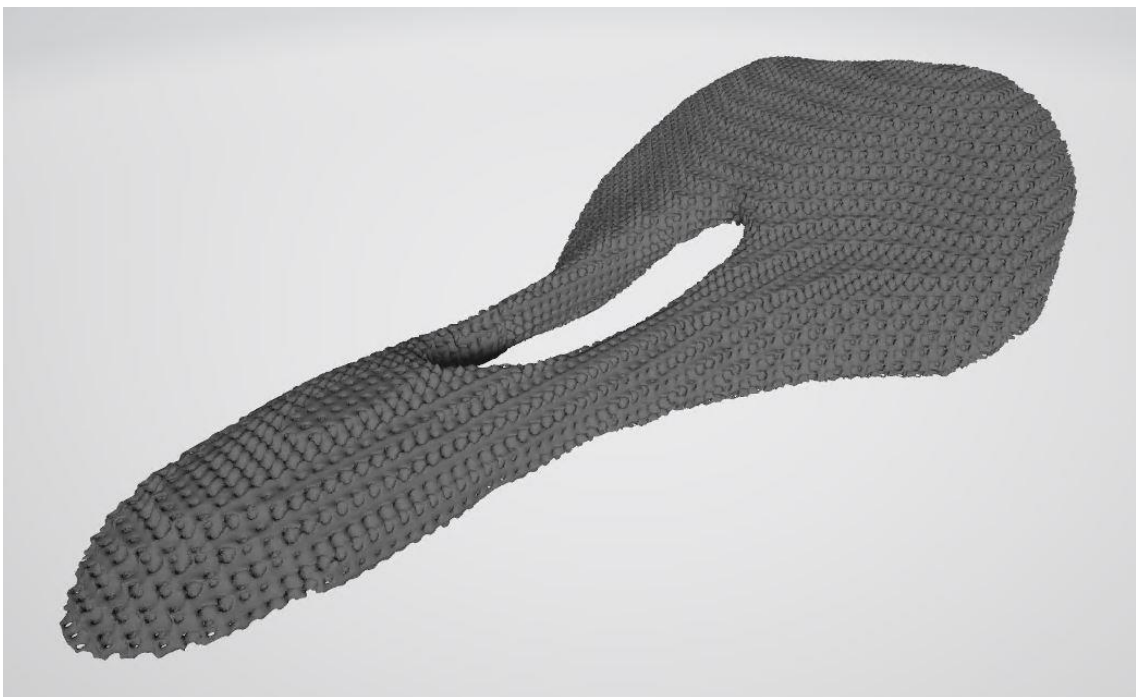
Tabulka 2: Parametry modelu 2

Model 2	
Element Dimens [mm]	2
Element Spacin [mm]	3
Grid Smoothing	4
Reduce [%]	60

### 5.6.1.3 Model 3

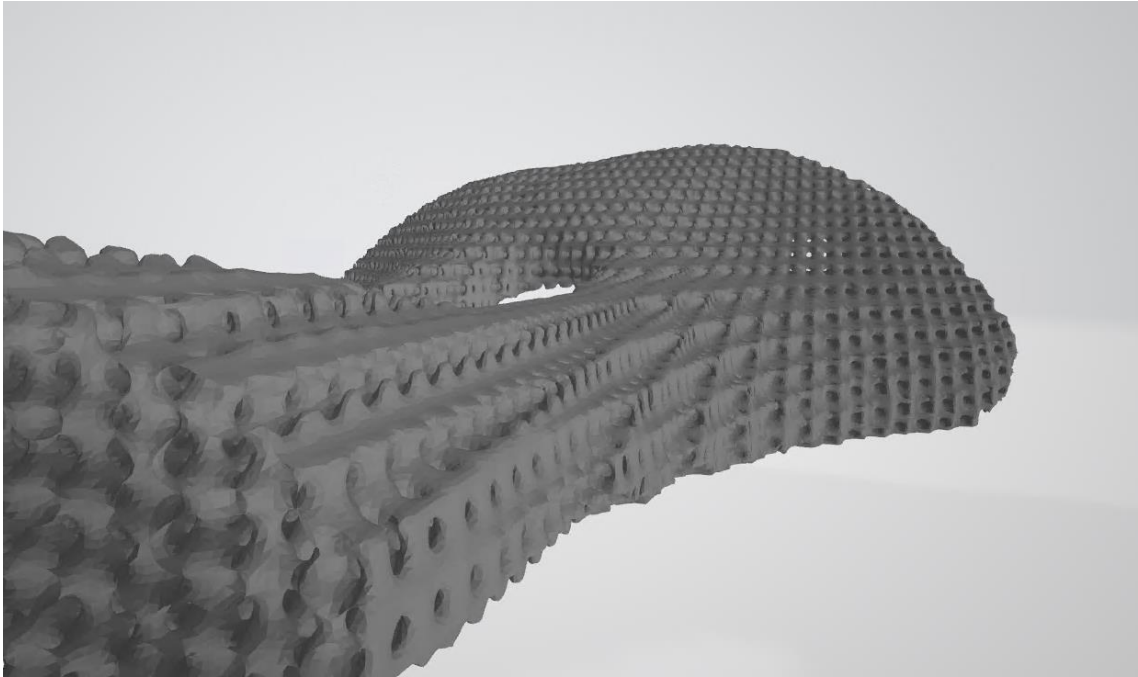
Testovaná tuhost – Hustá struktura

Model, který je zobrazen na Obrázek 76 a Obrázek 77 má viditelně menší dutiny, ale jeho povrch neobsahuje mnoho útvarů, které by se mohly začít zatrhávat a tudíž by životnost tohoto sedla mohla být vysoká.



Obrázek 76: Model 3

Z detailu na Obrázek 77 je vidět, že model obsahuje dutiny. A povrch je více či méně celistvý. Toto sedlo je jedním z největších kandidátů na samotnou realizaci.



Obrázek 77: Detail modelu 3

V Tabulka 3 je vidět, že Model 3 a Model 2 se liší pouze parametrem vyhlazení povrchu. Z bližšího pohledu se ale zdá, že dutiny v Modelu 2 jsou větší a Model 2 by měl být tedy lehčí. Model 3 by měl být ale odolnější.

Tuhost u této struktury vyšla okolo 0,02 mm.

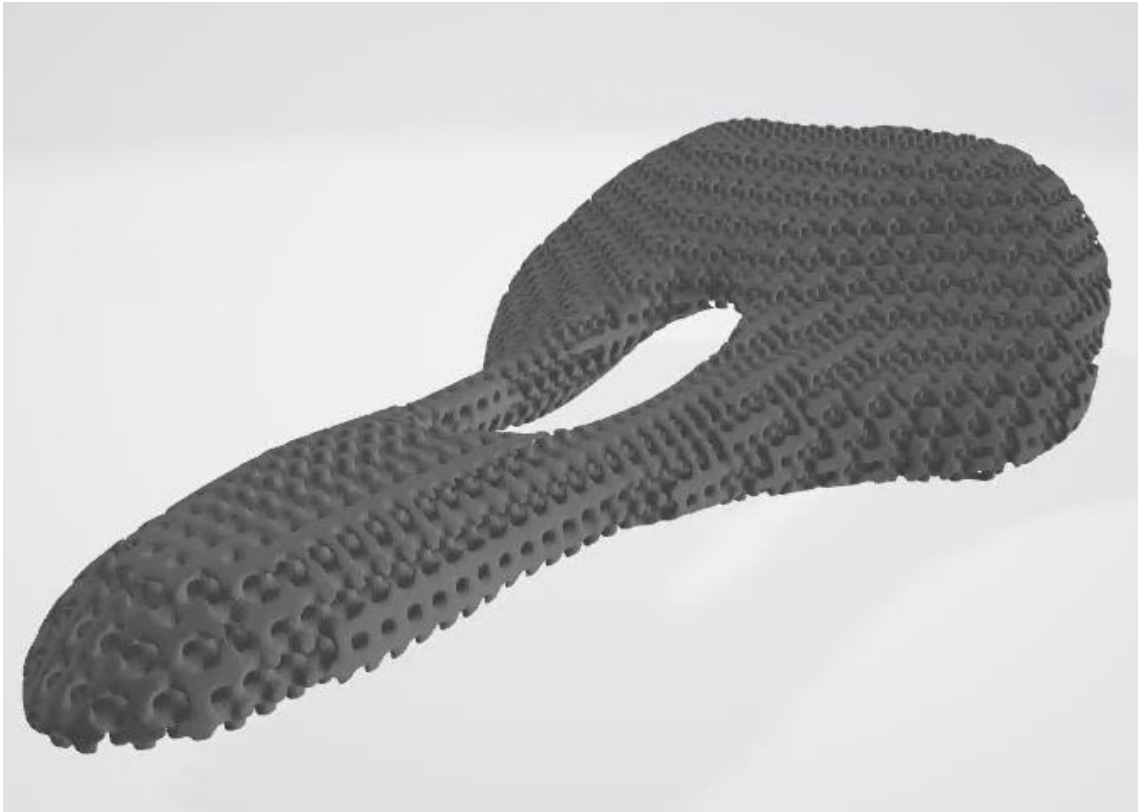
Tabulka 3: Parametry modelu 3

Model 3	
Element Dimens [mm]	2
Element Spacin [mm]	3
Grid Smoothing	5
Reduce [%]	60



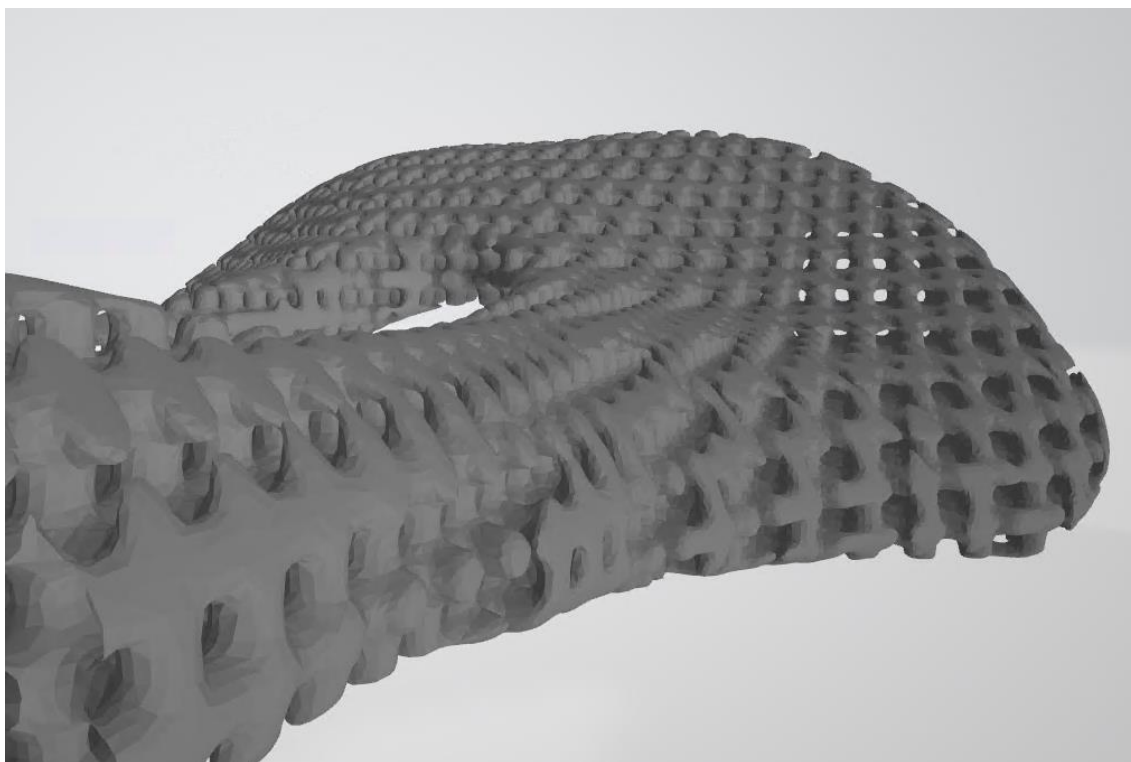
#### 5.6.1.4 Model 4

Model zobrazený na Obrázek 78 a Obrázek 79 reprezentuje verzi, kdy byla snaha vytvořit velké odlehčení. Povrch ale obsahuje velké množství volných pinů a jeho povrch je velmi necelistvý.



*Obrázek 78: Model 4*

Na Obrázek 79 je vidět detail Modelu 4 a také to, že svrchní vrstva modelu je necelistvá.



Obrázek 79: Detail modelu 4

V Tabulka 4 ukazuje, že v Modelu 4 byla použita poměrně velká hodnota Element spacingu, což mělo za výsledek mnoho dutin v objemu vygenerovaného tělesa. Na druhou stranu je ale malá hodnota Grid Smoothingu.

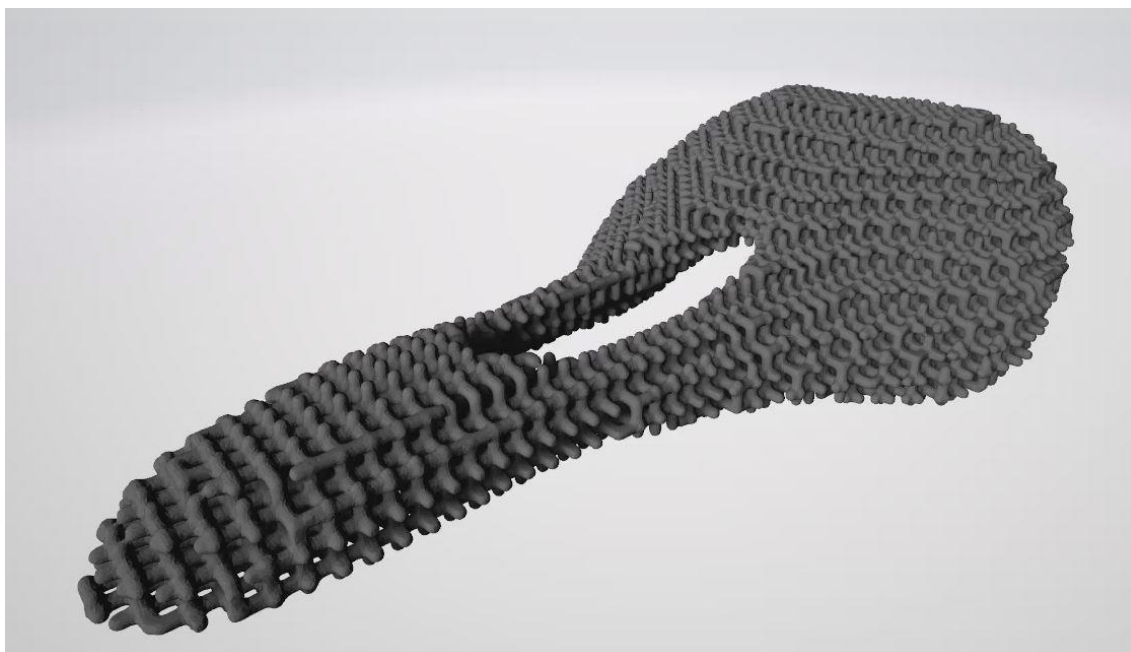
Tabulka 4: Parametry modelu 4

Model 4	
Element Dimens [mm]	3
Element Spacin [mm]	5
Grid Smoothing	1
Reduce [%]	50

### 5.6.1.5 Model 5

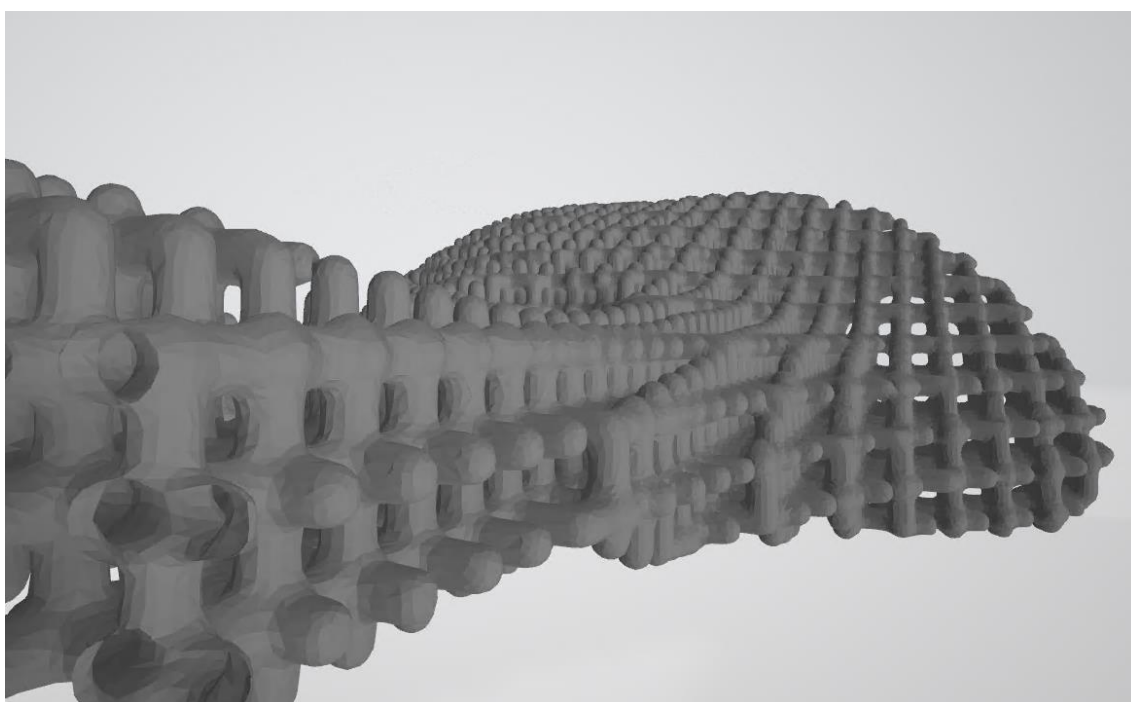
Testovaná tuhost – Řídká struktura

Model 5 je ukázka co možná největšího odlehčení, jak je vidět na Obrázek 80 a Obrázek 81. Tento model spíše ukazuje možnosti, které je možné vytvořit, než aby byl použitelný.



Obrázek 80: Model 5

Z detailu je vidět mnoho volných pinů. Z pohledů na model se zdá, že tento směr nemůže fungovat. Nevýhodou tohoto modelování je to, že nelze říci, jaký prototyp bude ten pravý a funkční. Lze tedy jen odhadovat. Pravda se ukáže až po vytisknutí modelu a následném vyzkoušení přímo na kole.



Obrázek 81: Detail modelu 5

V Tabulka 5 lze vidět parametry použité při tvorbě modelu 5. Na první pohled je vidět, že stejně jako výsledné modely se liší i parametry uvedené v tabulce. Struktura není moc hustá a je skrz ní doslova vidět.

Test tuhosti navíc ukázal, že deformace by byla okolo 0,06 mm.

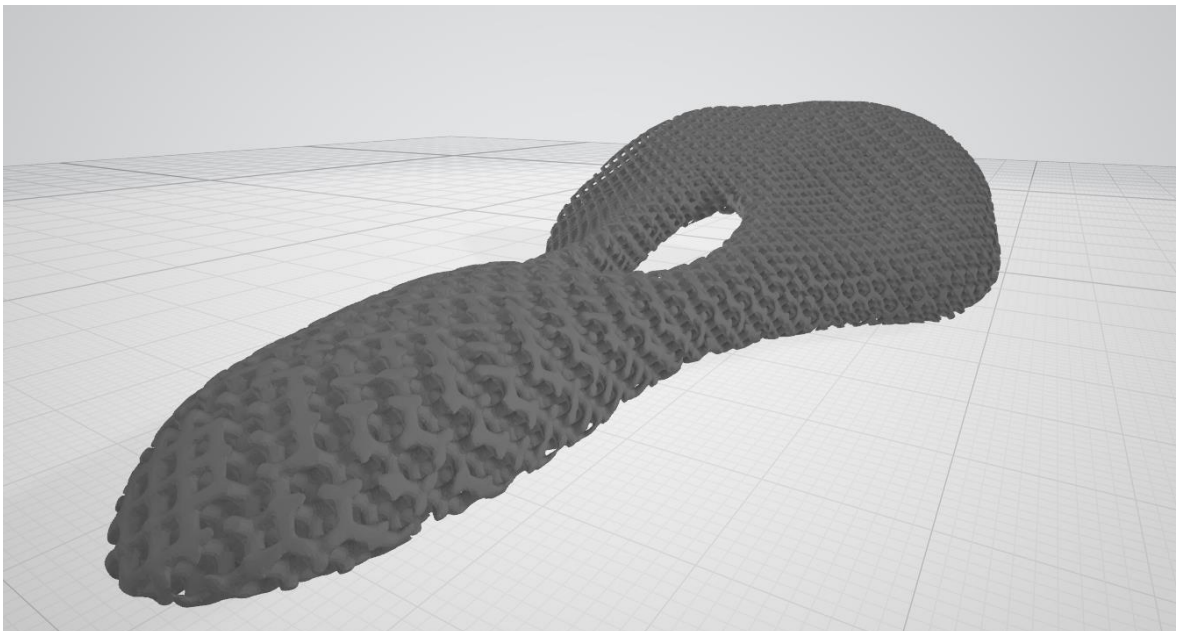
*Tabulka 5: Parametry modelu 5*

Model 5	
Element Dimens [mm]	3
Element Spacin [mm]	5,5
Grid Smoothing	1
Reduce [%]	50

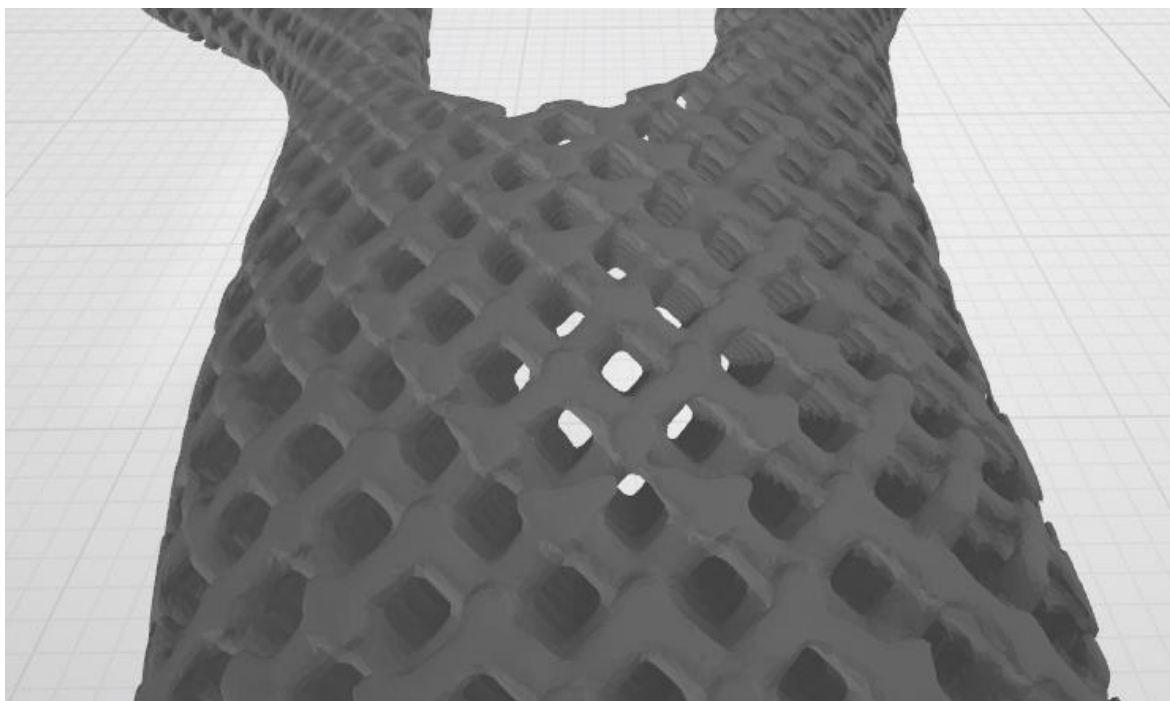
### 5.6.1.6 Model 6

Testovaná tuhost – Nakloněná struktura

Tento model se zdá být přiměřeně odlehčen. Oproti ostatním, piny nejsou tak markantní jako u Modelu 5. Lze to vidět na Obrázek 82 a Obrázek 83.



*Obrázek 82: Model 6*



Obrázek 83: Detail modelu 6

Problém tohoto modelu je, že je poměrně tuhý a vzorek se zdeformoval pouze o 0,04 mm.

Parametry struktury jsou uvedeny v Tabulka 6.

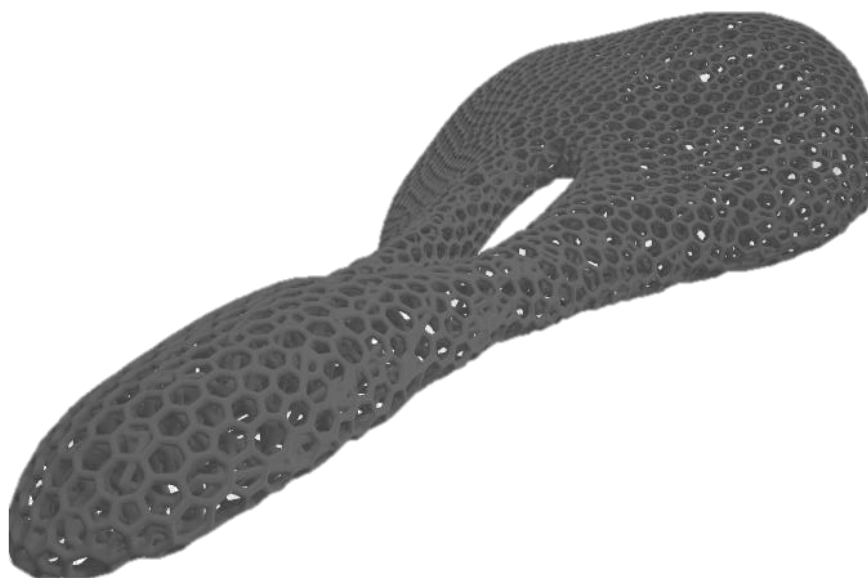
Tabulka 6: Parametry modelu 6

Model 6	
Element Dimens [mm]	2
Element Spacin [mm]	4
Grid Smoothing	2
Reduce [%]	50

### 5.6.1.7 Model 7

Testovaná tuhost – Struktura se šestistěnným vzorem povrchu

Jak je vidět na Obrázek 84, tento model má povrch naprosto bez volných pinů a jeho deformace vyšla okolo 1–2 mm. Byl vyráběn pomocí funkce Mesh + Delaunay Dual Edges a jeho parametry lze nalézt v Tabulka 7. Tento model se zdá být ideální pro následnou výrobu.



Obrázek 84: Model 7

Nutno dodat, že před výrobou této struktury bylo třeba původní model otisku přemeshovat na větší trojúhelníky, aby software dokázal strukturu vytvořit.

Tabulka 7: Parametry modelu 7

Model 6	
Element Dimens [mm]	1,5
Element Spacin [mm]	4
Grid Smoothing	2
Reduce [%]	50

### 5.6.2 Výběr varianty k tisku

Modely, u kterých bylo provedeno testování tuhosti byly také vybrány pro tisk. Pro tuto práci byly k dispozici dvě FDM tiskárny. Jedna Stratasys F370 a druhá Průša i3 MK3. Na tiskárně Průša se tisklo z materiálu PLA a tyto výtisky měly sloužit pro vizualizaci a také pro to, abychom si otestovali, zda lze tuto strukturu vůbec bez problémů vytisknout.

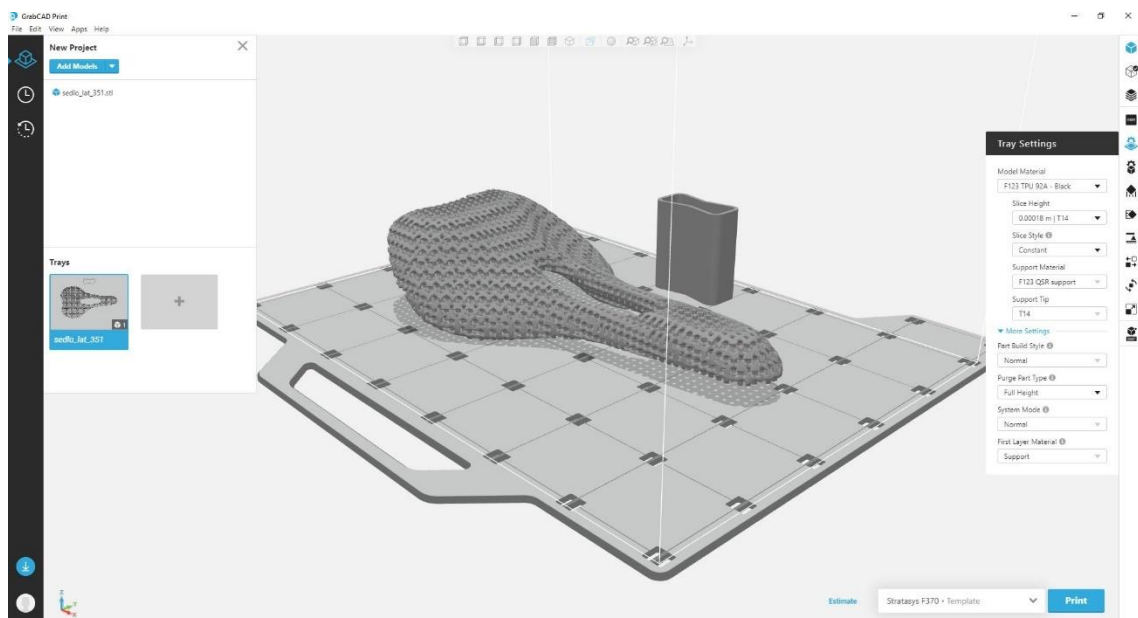
Na tiskárně Stratasys se tisklo z flexibilního TPU a výtisky z této tiskárny by měly být použitelné na kole.

Postup přípravy tisku lze nalézt v následujících kapitolách.

### 5.6.3 Příprava kódu pro tiskárnu Stratasys

Stratasys používá pro generování kódu software GrabCAD, který v sobě má předdefinované parametry pro tiskárny firmy Stratasys.

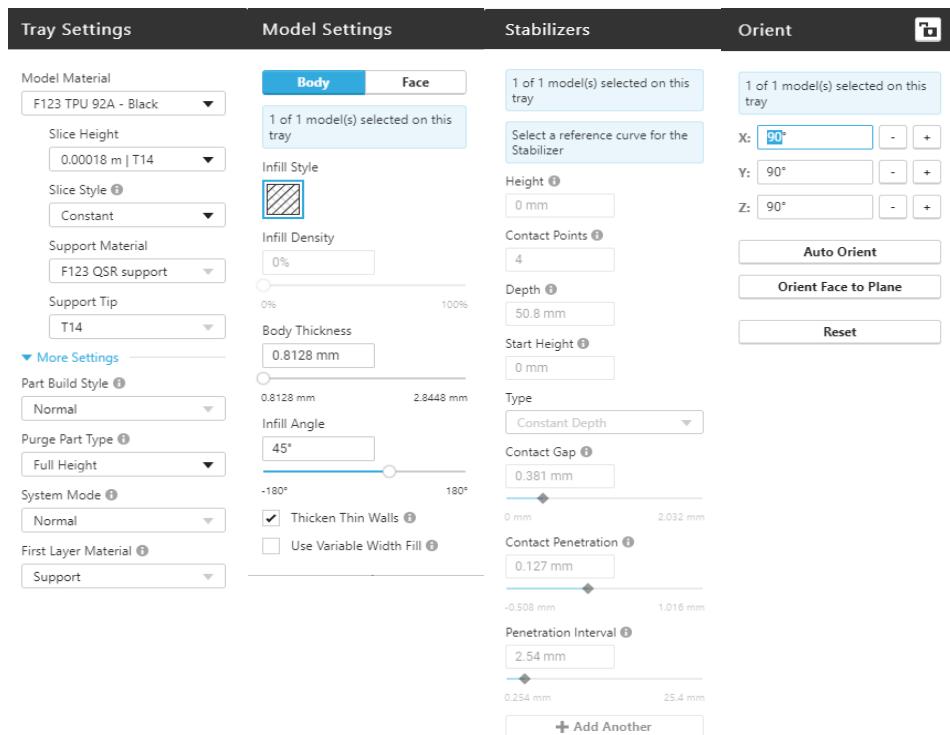
Pracovní prostředí softwaru i s importovaným modelem lze vidět na Obrázek 85. V pravém dolním rohu tohoto obrázku lze vidět rozbalovací okno, ve kterém lze zvolit tiskárnu, na které bude tisk probíhat. V tomto případě se bude jednat o typ F370. Volba tiskárny se provádí hned po nahrání modelu, čímž se automaticky nastaví řada parametrů, které mají pevně dané hodnoty dle vybrané tiskárny. Dalším krokem je výběr materiálu, který byl v tomto případě elastický TPU. Pro tento materiál lze vybrat výšku vrstvy 0,18 nebo 0,25 mm. Aby byl tisk detailnější, byla zvolena varianta 0,18 mm.



Obrázek 85: Model v GrabCAD

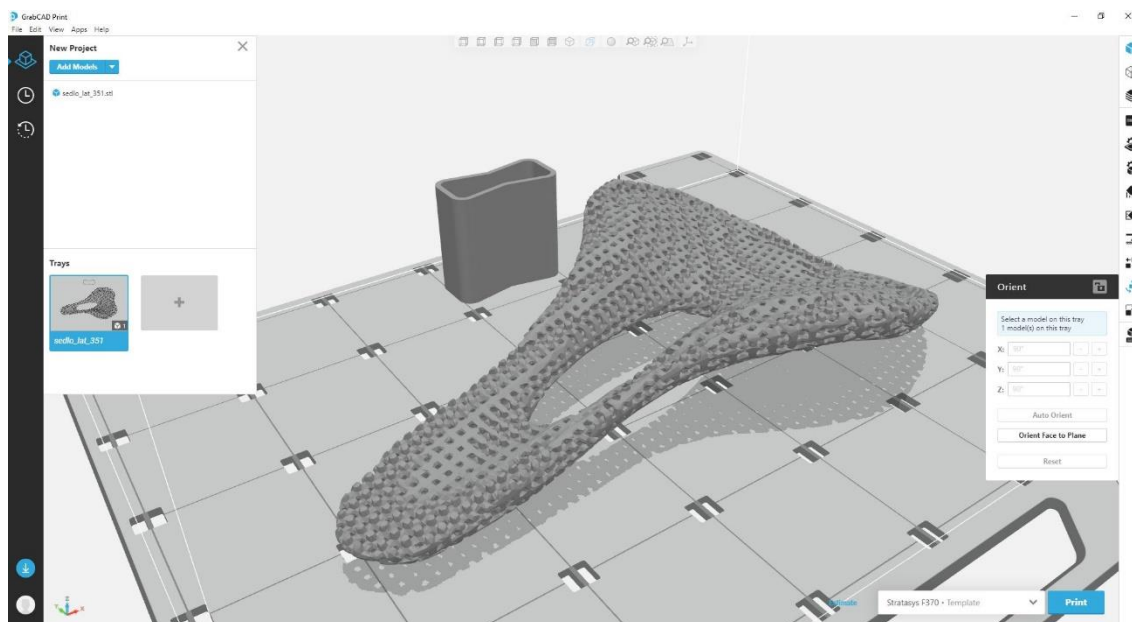
Výběrem materiálu se nastavil automaticky i materiál podpory na F132 QSR, který se dá z vytištěného dílu dostat pomocí rozpuštění ve speciálním louhu, typ podpory a styl stavby modelu. Dále se automaticky nastavilo, že první tištěná vrstva bude z materiálu pro podpory. Zbývající parametry, zobrazené na Obrázek 86, byly ponechány na defaultní hodnotě nebo se předdefinovaly volbou materiálu.





Obrázek 86: Parametry tisku

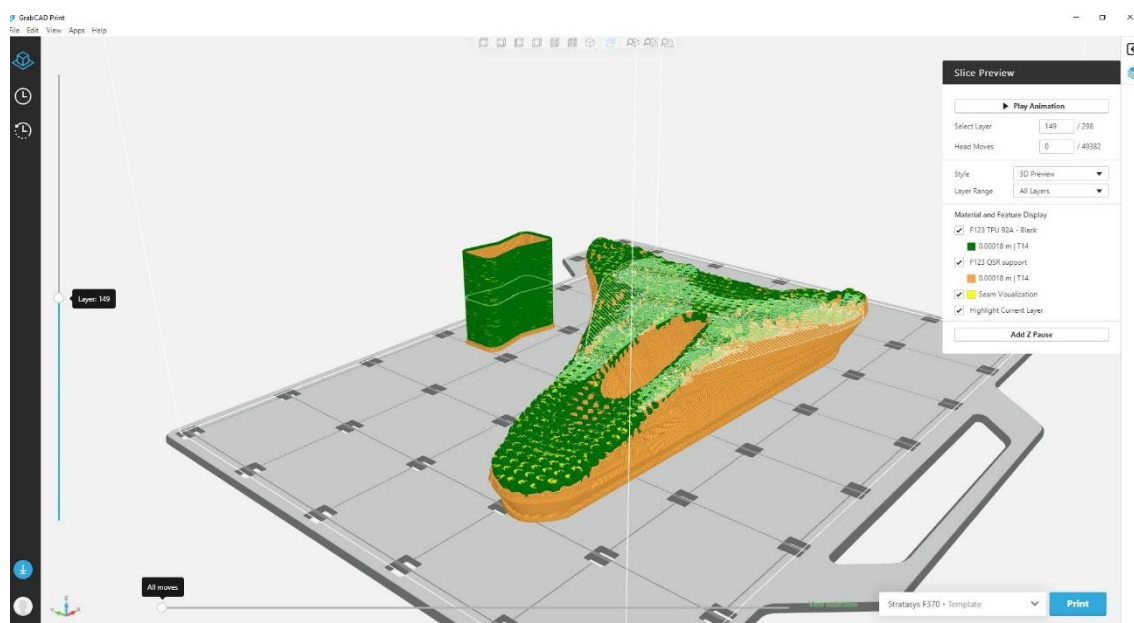
Polohu a orientaci modelu na podložce lze nastavit manuálně. V tomto případě byla ale využita funkce Auto Orient pro automatické otočení modelu. Pozice, ve které se bude model tisknout je zobrazena na Obrázek 87. Jak je vidět, software sedlo otočil tak aby se tisklo „hlavou dolů“, čímž by se měl ušetřit materiál pro podpory. Po tomto kroku už zbývá jen zahájit simulaci tisku.



Obrázek 87: Napoložený model

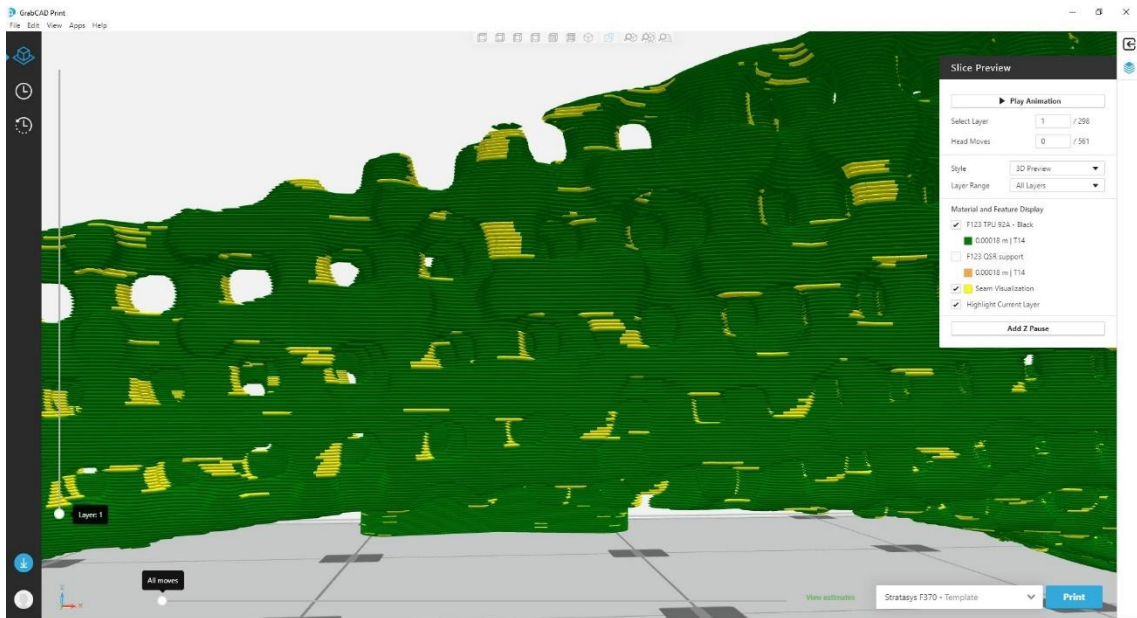


Na Obrázek 88 lze vidět provedenou simulaci (slicování). Oranžově je zobrazen materiál podpor a zeleně stavební TPU. Žlutě jsou zobrazeny švy, což jsou koncové a počáteční body jednotlivých vláken. Na levé straně se nachází posuvník, kterým lze zobrazovat jednotlivé vrstvy modelu. Vybraná vrstva se následně zobrazí bílou vrstvou. V tomto konkrétním případě výtisk obsahuje 298 vrstev a tisková hlava vykoná 49382 pohybů. Mezi jednotlivými pohyby lze přepínat pomocí posuvníku ve spodní části okna.

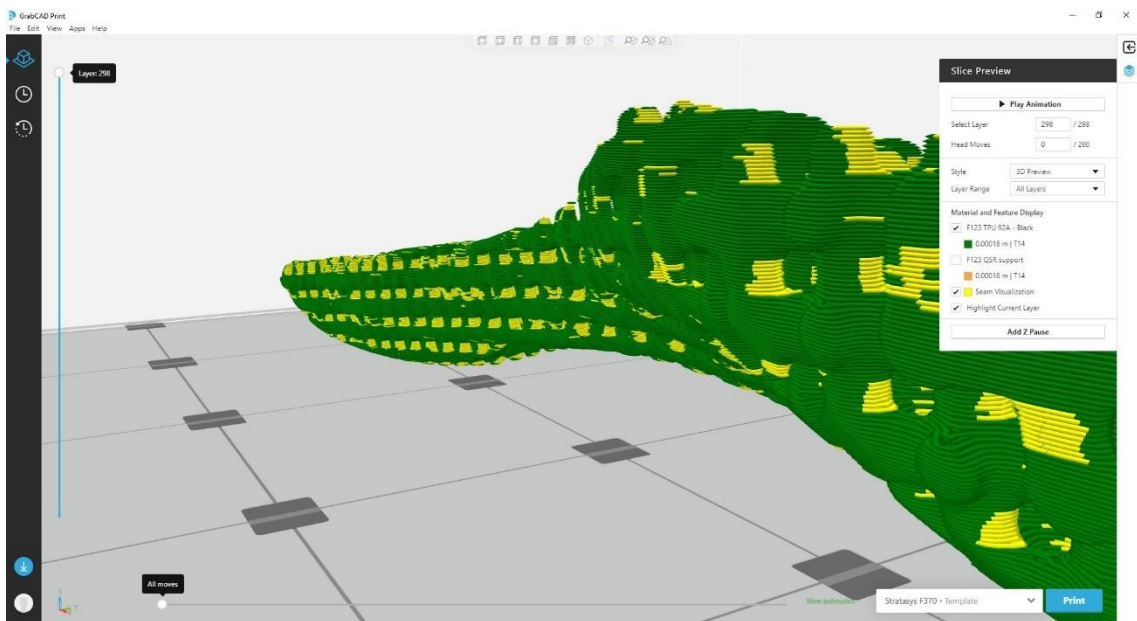


Obrázek 88: Naslicovaný model

Na Obrázek 89 a Obrázek 90 lze vidět v detailu vytištěný díl. Je možné pozorovat, že i volné piny by měly být vytištěny velmi přesně. Podle těchto vizualizací by měl být finální výtisk téměř totožný s modelem.

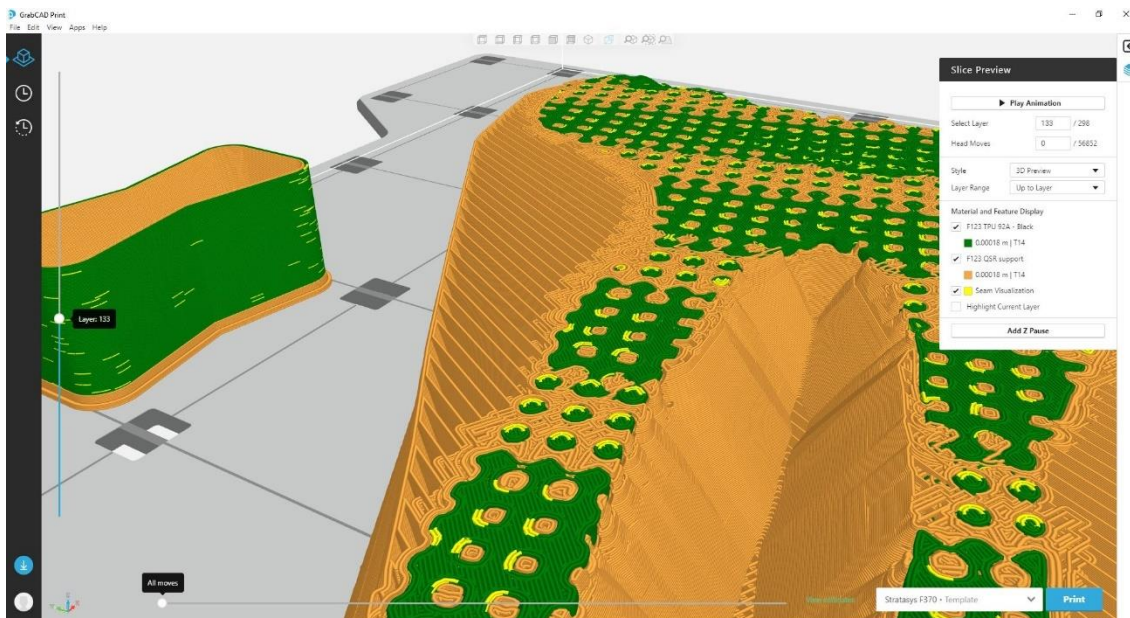


Obrázek 89: Vizualizace detailu výtisku



Obrázek 90: Detail 2

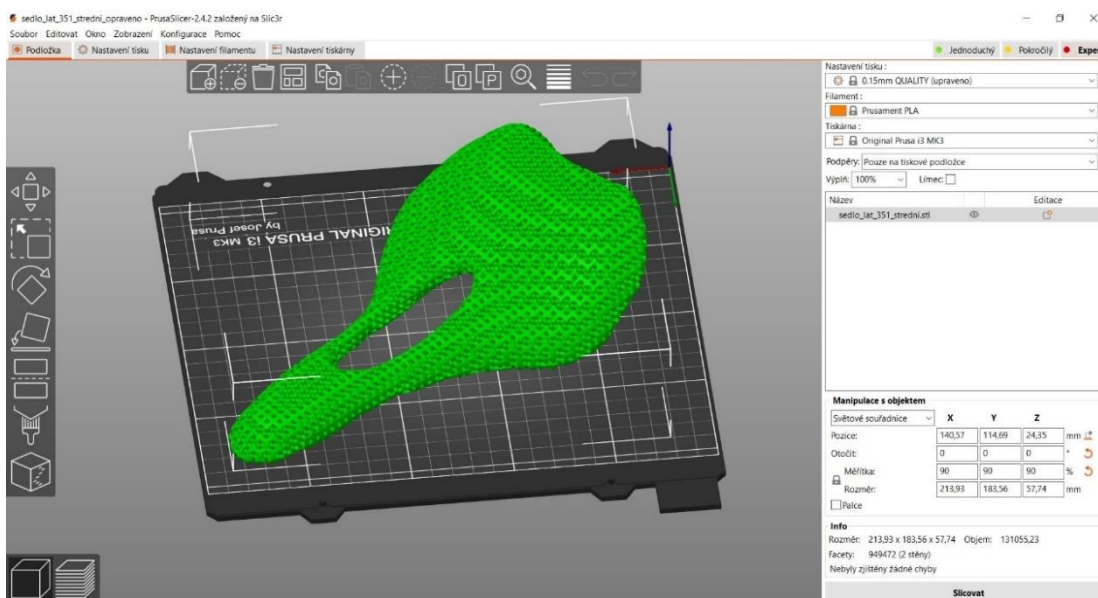
Protože model obsahuje mnoho vnitřních dutin a převisů, budou podpory i uvnitř výtisku, odkud je nelze odstranit manuálně pomocí jednoduchého ručního nářadí. Lze to pozorovat na Obrázek 91. Aby bylo možné podpory odstranit i zevnitř modelu, je materiál podpor F123 QSR možné rozpustit v detergentním roztoku.



Obrázek 91: Postup tisku modelu

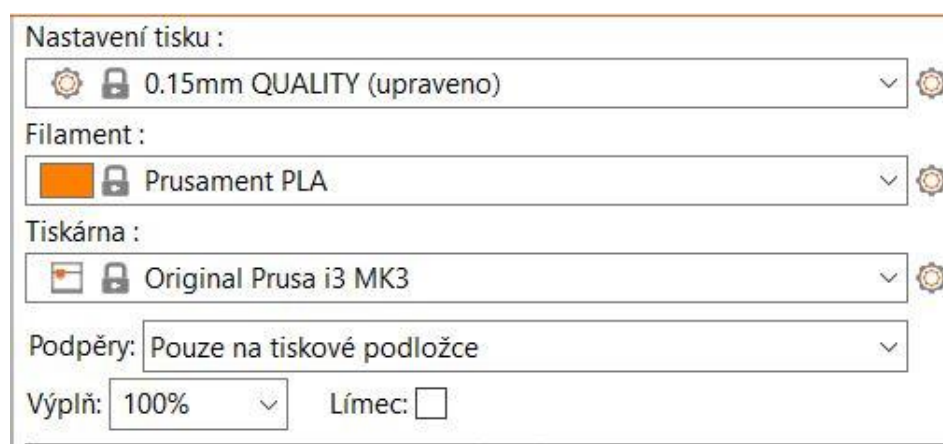
#### 5.6.4 Příprava kódu pro tiskárny Průša

Výrobce tiskáren Průša disponuje také svým softwarem pro tvorbu programů pro tiskárny, který se jmenuje Prusa Slicer. Největší výhodou je, že je tento software zadarmo a lze ho přenastavit i pro jiné tiskárny než pro ty se značkou Průša. Jak je vidět na Obrázek 92, největší část zabírá vizualizace tiskové podložky, kde si zcela jednoduše můžeme nastavit, jak má být model na podložce napoložován. Pro základní pohyby s modelem slouží panel na levé straně okna.



Obrázek 92: Prostředí systému Prusa Slicer

Na pravé straně okna lze nahoře vidět nastavení základních parametrů tisku. Těmi jsou tloušťka trysky extruderu, která ovlivňuje přesnost a rychlost tisku, materiál a typ tiskárny. Dále je zde možnost zvolit procento výplně, což má vliv na pevnost a přesnost výtisku. Detail této tabulky je zobrazen na Obrázek 93. V neposlední řadě je zde možnost určit vlastnosti podpěr, které mohou být buď všude, kde svírá model nižší než definovaný kritický úhel převisu, který bývá obvykle 45°, protože jinak se model začne hroutit. Dále je zde možnost podpory vypnout nebo zvolit jen ty, které vychází z tiskové podložky a v objemu modelu se nevytvoří. Pro případ tisku sedel byly použity podpěry, které jsou pouze na tiskové podložce a hodnotou kritického úhlu převisu bylo zabráněno tomu, aby se podpory tvořily uvnitř modelu, protože by nebylo možné je odtud dostat. Materiál podpor a modelu je totiž v tomto případě shodný.



Nastavení tisku :

0.15mm QUALITY (upraveno)

Filament :

Prusament PLA

Tiskárna :

Original Prusa i3 MK3

Podpěry: Pouze na tiskové podložce

Výplň: 100% Límec:

Obrázek 93: Nastavení tisku

Na Obrázek 94 je vidět nastavování rozměrů a měřítka modelu. Je zde možnost změnit rozměr v každé ose zvlášť, nebo změnit měřítko, čímž dojde ke změně rozměrů bez toho, aby byly změněny proporce modelu. U tisku sedla bylo změněno měřítko na 90 %, jak již bylo napsáno výše.



**Manipulace s objektem**

Světové souřadnice ▾

	X	Y	Z	
Pozice:	140,57	114,69	24,35	mm
Otočit:	0	0	0	°
Měřítka:	90	90	90	%
Rozměr:	213,93	183,56	57,74	mm

Palce

---

**Info**

Rozměr: 213,93 x 183,56 x 57,74    Objem: 131055,23

Facety: 949472 (2 stěny)

Nebyly zjištěny žádné chyby

Obrázek 94: Měřítka a rozměry

Na Obrázek 95 se nachází výstřižek z pokročilejšího nastavení modelu. Zde je možné nastavovat úplně všechno, na co si uživatel vzpomene. Za zmínku stojí například to, že je důležité nastavit alespoň 1 vrstvu raftu, což je rozšíření podpěr na podložce tak, aby nedošlo k odlepení materiálu a model hezky držel. Co se může stát, když se raft zapomene nastavit lze vidět na Obrázek 96.

**Podpěry**

- Generovat podpěry:
- Automaticky generované podpěry:
- Mezní úhel převisu: 18  °
- Vynutit podpěry pro prvních: 0  vrstva(y)
- Hustota první vrstvy: 90  %
- Rozšíření první vrstvy: 3  mm

---

**Raft**

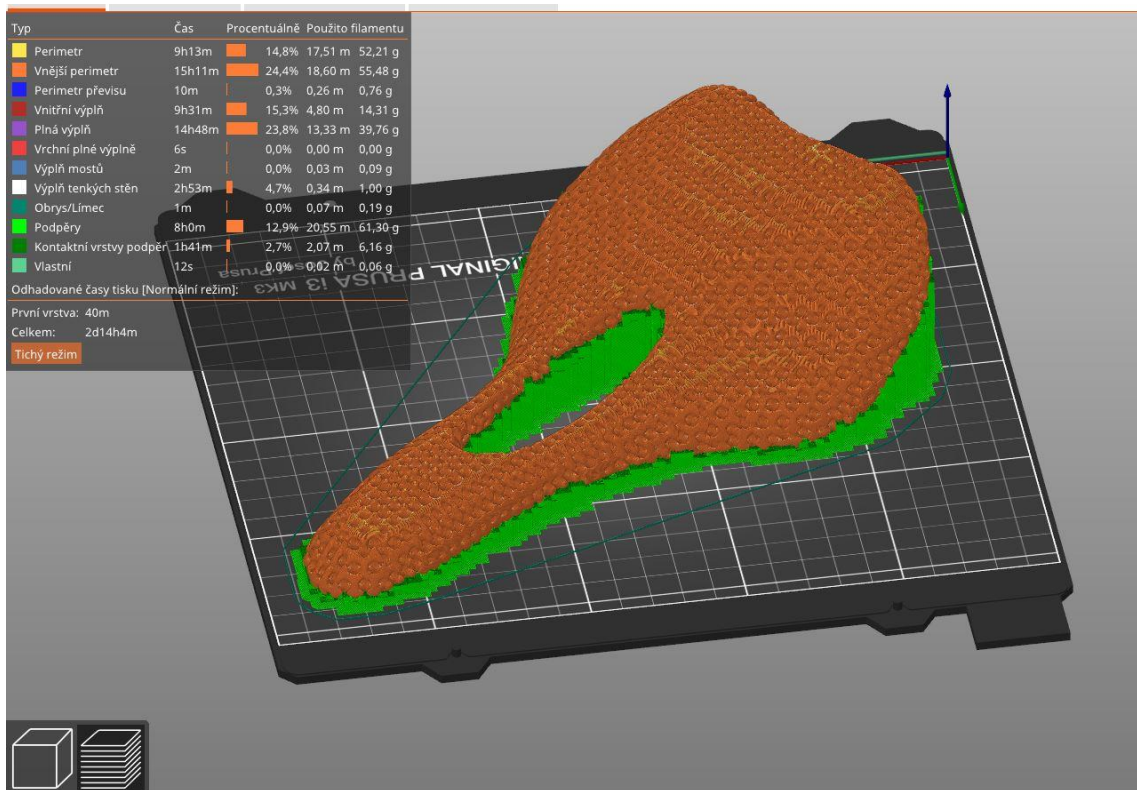
- Vrstev raftu: 2  vrstva(y)
- Mezera mezi objektem a raftem v ose Z: 0,2  mm
- Rozšíření raftu: 1,5  mm

Obrázek 95: Pokročilejší nastavení

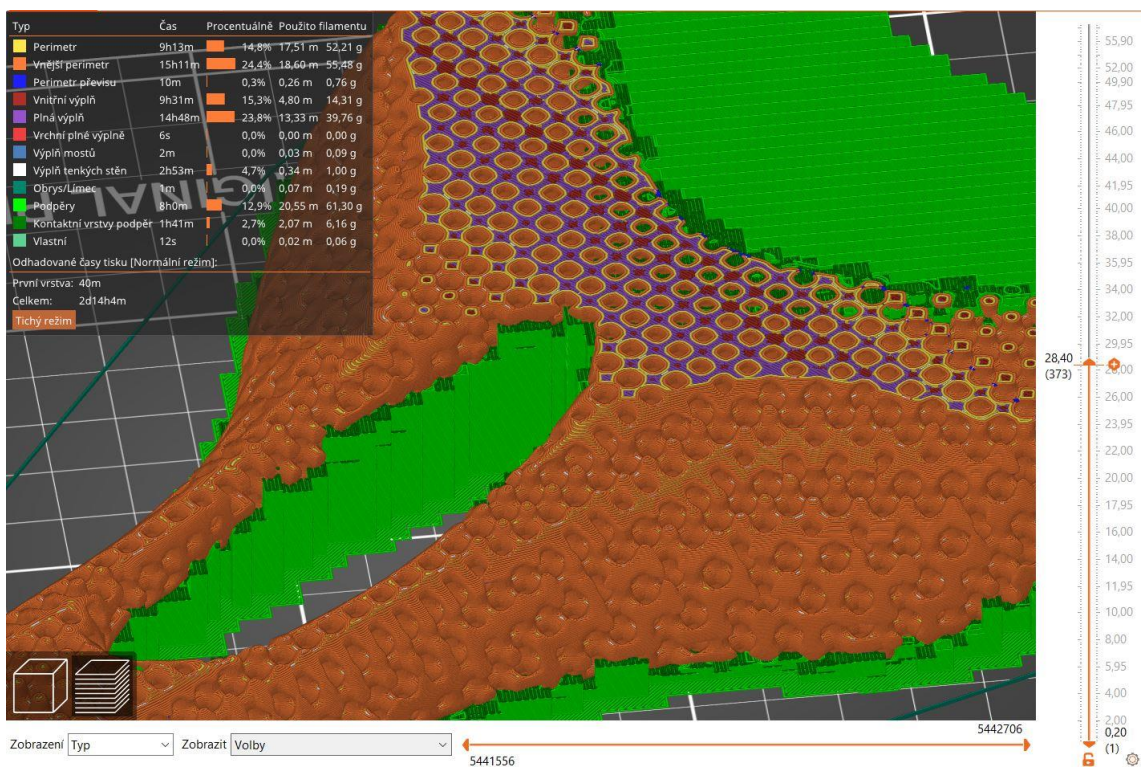


Obrázek 96: Absence raftu

Po nastavení všeho potřebného a doběhnutí Slicování ukáže program vizualizaci vytištěného tělesa stejně, jako lze vidět na Obrázek 97. Na Obrázek 98 lze vidět, jak bude vypadat model uvnitř. Pomocí posuvníků po stranách okna na Obrázek 98 lze posouvat po jednotlivé vrstvě a sledovat, jak bude materiál na podložce přibývat. Zároveň je možné vidět, zda budou podpory zasahovat do vnitřku modelu, což lze pohodlně díky tomu, že jednotlivé formy materiálu jsou barevně odlišeny a popsány v tabulce při doběhnutí Slicování.



Obrázek 97: "Naslicovaný model"

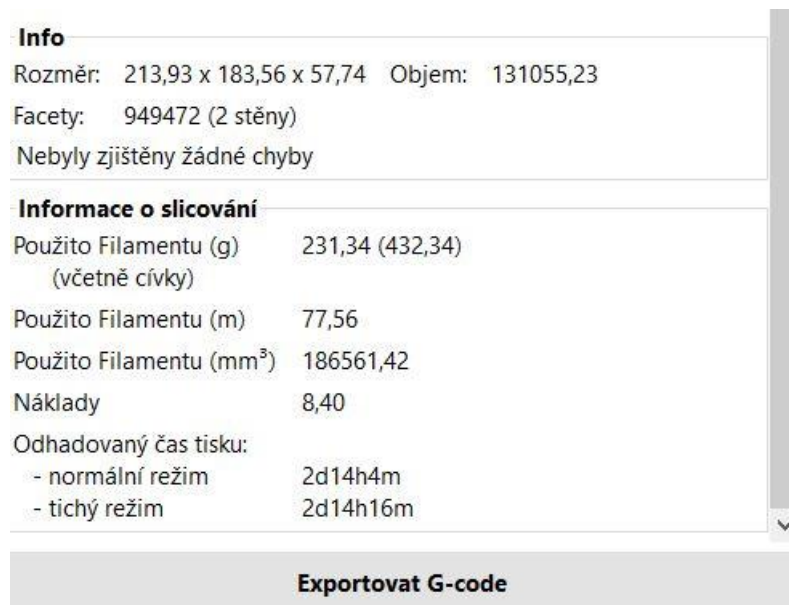


Obrázek 98: Vizualizace tisku

Program také dokáže vypočítat dobu tisku, hmotnost a délku použitého filamentu a náklady. Tyto hodnoty pro tisk střední struktury lze vidět na Obrázek



99, kde se nachází také tlačítko „Exportovat G – code“, pomocí kterého program exportuje kód, který se pomocí paměťové karty vloží do tiskárny, ve které slouží jako zdroj dat pro tisk.



Info	
Rozměr:	213,93 x 183,56 x 57,74
Objem:	131055,23
Facety:	949472 (2 stěny)
Nebyly zjištěny žádné chyby	

Informace o slicování	
Použito Filamentu (g) (včetně cívky)	231,34 (432,34)
Použito Filamentu (m)	77,56
Použito Filamentu (mm <sup>3</sup> )	186561,42
Náklady	8,40
Odhadovaný čas tisku:	
- normální režim	2d14h4m
- tichý režim	2d14h16m

**Exportovat G-code**

Obrázek 99: Parametry výtisku

## 5.7 Hodnocení prvních výtisků

### 5.7.1.1 Průša

Výtisky zhotovené z PLA na tiskárně Průša lze vidět na Obrázek 100 a Obrázek 101. Bohužel je ale nutné říct, že ani jedna varianta není vhodná pro využití na kole.

U Hrubé struktury, která je v detailu zobrazena na Obrázek 101 jsou problematické volné piny, které úplně nejsou slučitelné s ergonomickým sedlem a výtisk jako takový nelze nazvat zcela povedeným.

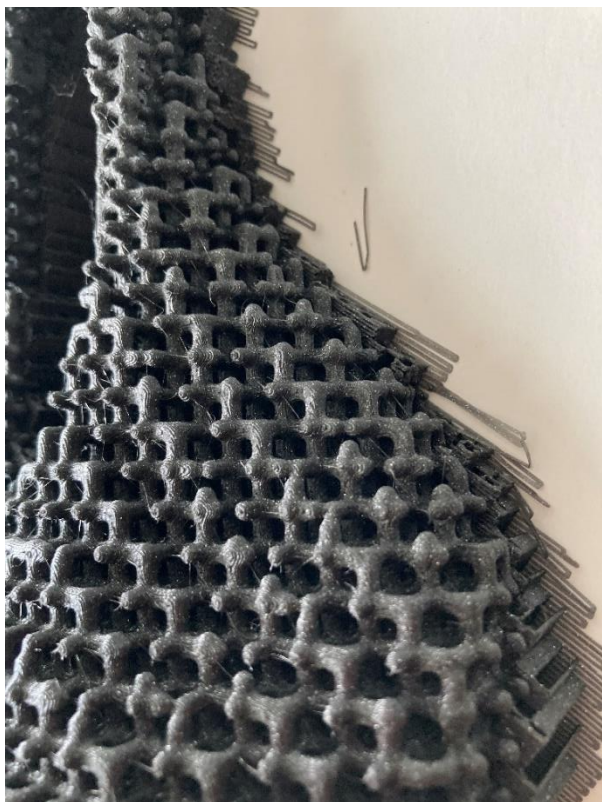
U sedla s jemnou strukturou je problém v tom, že model není moc odlehčený a navíc je na modelu velmi vidět slicování a jednotlivé vrstvy.

Oba vytištěné modely mají ještě společnou chybu a to je stringování, což znamená, že mezi jednotlivými trámky odlehčené struktury zůstávají zbytková vlákna tiskového materiálu, která se neoddělila od trysky.





Obrázek 100: Hrubé (vlevo) a jemné (vpravo) sedlo vytisklé na Průša tiskárně



Obrázek 101: Struktura hrubého sedla

### 5.7.1.2 Stratasys

Jak již bylo napsáno výše, na tiskárně Stratasys se tiskl odlehčený model s hustou strukturou z materiálu TPU. Tisk se ale přerušil z důvodu vypršení životnosti tiskové hlavy v poloze, která je vidět na Obrázek 102 vlevo. I když tisk nedoběhl do konce, bylo možné vidět kvalitu tisku lattice struktury z materiálu TPU tisknuté metodou FDM. Protože se natavený TPU chová jako „žvýkačka“ a mezi nanášením jednotlivých vláken není možné proud materiálu zcela přerušit, docházelo ke stringování, které lze vidět v pravé části stejného obrázku, ještě více než u tiskárny Průša a materiálu PLA. Lze tedy říci, že i kdyby tisk doběhl do konce, vyrobené sedlo by stejně nebylo použitelné.



Obrázek 102: Vlevo - průběh tisku na Stratasys; Vpravo - detail výtisku

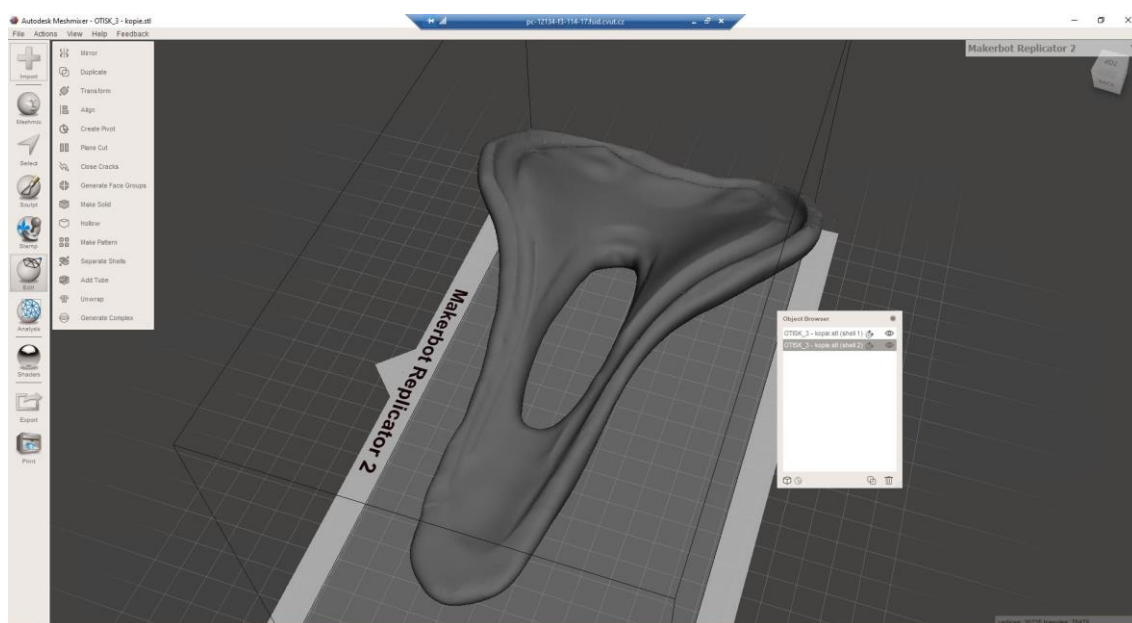
## 5.8 Výroba modelu s odlehčenou strukturou uvnitř sedla

Protože se ukázalo, že vytisknout sedlo kompletně z odlehčené struktury není ideálním řešením z důvodu stringování, je třeba vytvořit jinou variantu modelu. Vlákna v odlehčené struktuře nemají žádný vliv na funkci sedla (pružení) a ani nijak extrémně neovlivňují hmotnost. Jejich vliv je spíše na estetiku, ale také je možné, že kdyby se vyskytovaly na sedle během jízdy, mohlo by docházet k zadržování a zničení výrobku. Na místě je tedy využít potenciál aditivní technologie.

Řešení by tedy mohlo mít podobu modelu, který je na povrchu hladký a odlehčená struktura by byla uvnitř. Dá se říct, že by na povrchu byla celistvá slupka a uvnitř odlehčená struktura.

Pro výrobu takového modelu byl opět použit program Meshmixer. Jako základ byl použit vyhlazený model sedla, který byl použit již pro předchozí modely a procesy modelování obou variant se rozcházejí před generováním odlehčené struktury.

Aby bylo možné vytvořit slupku okolo odlehčené struktury, nabízí Meshmixer funkci Hollow, která vytvoří vnitřní kopii modelu odsazenou o požadovanou vzdálenost od mraku bodů původního modelu. Pro tento konkrétní příklad byla zvolena hodnota odsazení 3 mm. Na Obrázek 103 už je vidět, že se vygeneroval druhý „SHELL“, který je menší než původní model a představuje plochu, na kterou bude přiléhat odlehčená struktura.

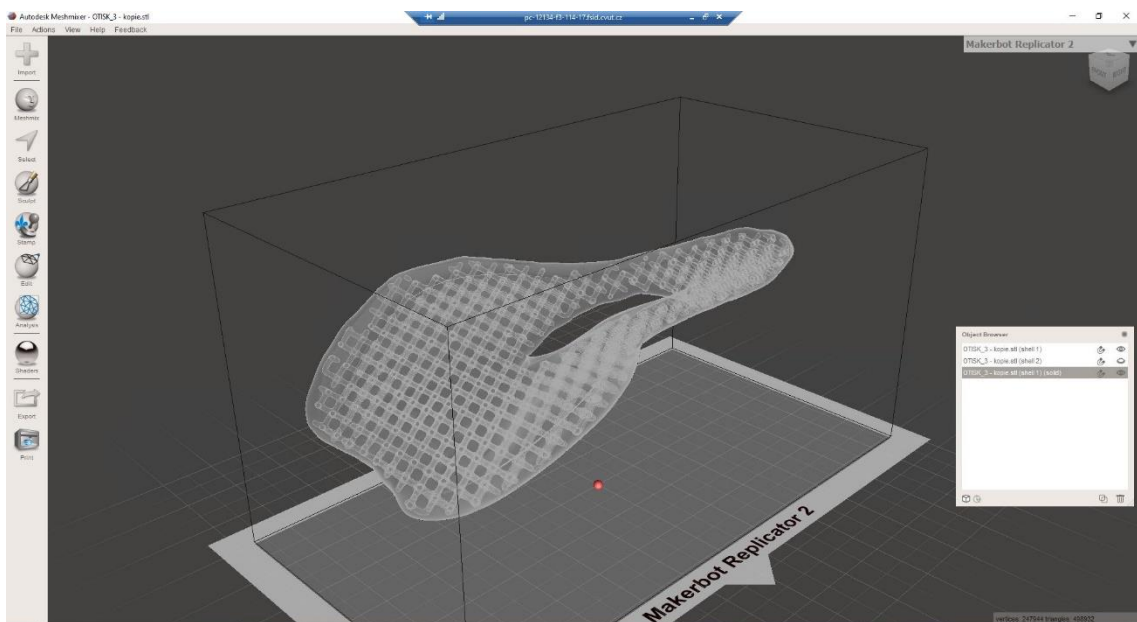


Obrázek 103: Tvorba skořepiny

Aby bylo možné dále pracovat s oběma mraky bodů, je potřeba jít do záložky SELECT, přes klávesovou zkratku Ctrl + A vybrat vše a následně přes záložku EDIT zakliknout možnost FIT NORMALS.

Dalším krokem je vytvoření odlehčené struktury jako v předchozích případech. Parametry odlehčené struktury byly zvoleny stejném jako pro Model 5

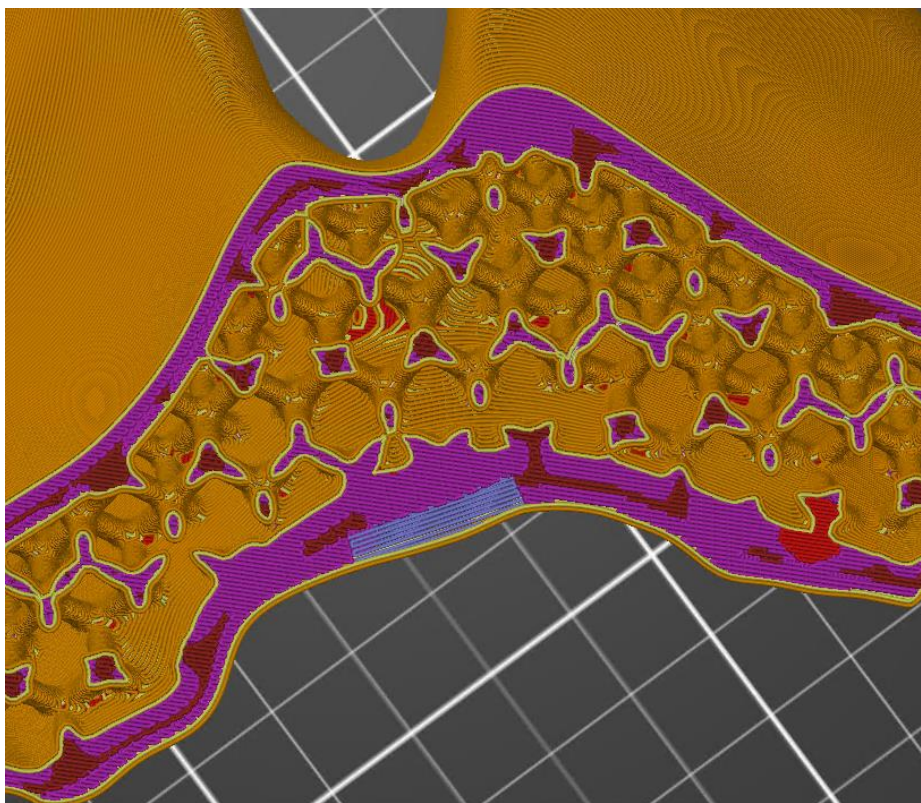
vytvořený výše. Nutno dodat, že nová odlehčená struktura byla potočena v obou osách rovnoběžných s tiskovou podložkou o 45°, aby byla naprosto vyloučena potřeba podpor při tisku. Tato struktura byla vytvořena pro vnitřní – menší SHELL a právě rozdíl mezi nimi vytvoří požadovanou „slupku“. Po vytvoření vnitřní odlehčené struktury je posledním krokem v postupu označení vnějšího SHELLu vytvořené struktury a následné použití funkce COMBINE, čímž se obě části spojí a vytvoří se jednotný model s vnitřní strukturou. Výsledek lze vidět na Obrázek 104.



Obrázek 104: Vnitřní struktura

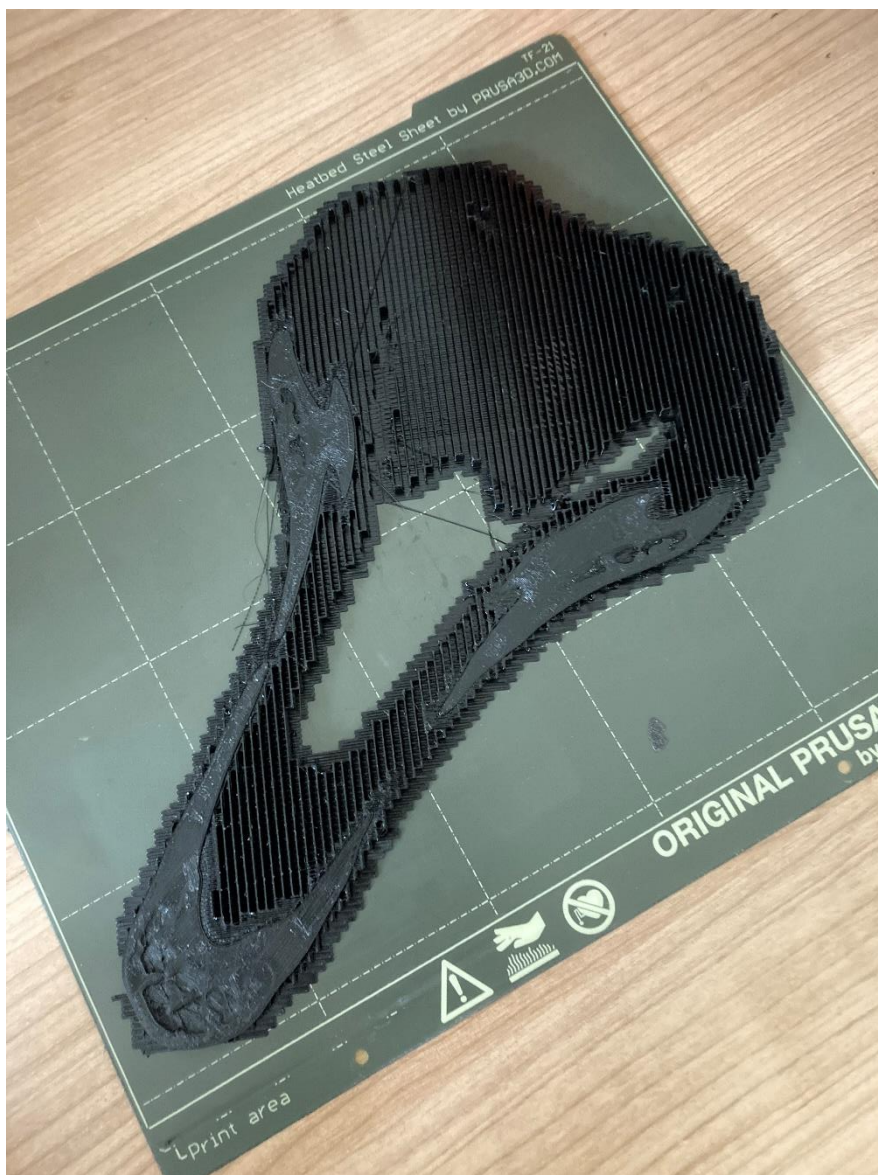
Vyexportovaný stl model byl předurčen k tisku na tiskárně Průša, ale už z flexibilního materiálu SemiFlex. Ostatní parametry zůstaly stejné. Jak by měl vypadat vnitřek modelu lze vidět na Obrázek 105, který ukazuje simulaci tisku v programu Prusa Slicer.





*Obrázek 105: Řez naslicovaným sedlem s vnitřní lattice strukturou*

Samotný tisk z flexibilního materiálu se stejně jako na tiskárně Sratasys vůbec nepovedl. Opět nastal problém s tím, že když měla tiskárna začít tvořit odlehčenou strukturu, materiál se nedal oddělit a došlo ke zničení výtisku. Je ale vhodné ukázat, že jak je vidět na Obrázek 106, když se tiskly části modelu s podporami, které jsou celistvé, problém nenastal.



Obrázek 106: Tisk modelu s vnitřní lattice strukturou na tiskárně Průša

Závěr z této kapitoly lze tedy udělat takový, že FDM tiskárna není na tisk modelu sedla vhodná a nejlepší by bylo použít metodu MJF. V tomto případě by byla nejvhodnější varianta modelu pro tisk ta se šestihranným vzorem na povrchu, kde se nenachází volné piny a má vhodnou tuhost.

## 6 Závěr

Hlavním cílem teoretické části práce bylo seznámit čtenáře s tím, co je to reverzní inženýrství a představit mu tento obor. Na samém začátku byla popsána historie tohoto oboru, oblasti, kde nachází uplatnění a také jeho výhody.

V dalších kapitolách bylo možné se dočíst, jak a čím se získávají data a jak se dále zpracovávají. Metody sběru dat zde byly rozděleny do dvou skupin, a to na kontaktní a bezkontaktní, byl zde popsán jejich princip a příklady použití. Z kontaktních metod byl představen souřadnicový měřicí stroj a z bezkontaktních kamerové snímání ve 2D, metody, které pracují na principu triangulace, chromatický senzor bílého světla a výpočetní tomografie. V následující kapitole byla rozebrána práce s daty a popsán postup reverzního inženýrství. V návaznosti na toto byla představena hardwarová zařízení a programy, které se k tomuto účelu používají. Posledním tématem teoretické části bylo představení aditivních technologií pro zpracování polymerů, se kterými se, jak už název práce napovídá, bude dále pracovat. Byly zde představeny principy a konstrukce jednotlivých 3D tiskáren. Pro příklad lze uvést asi nejvíce používanou FDM tiskárnu, dále SLS a MJF. Na tiskárny navazuje kapitola, která se věnuje používaným polymerním materiálům, kde bylo uvedeno několik často používaných zástupců a jejich základní vlastnosti a využití.

V praktické části bylo hlavním cílem vytvořit ergonomické sedlo na kolo pomocí metod reverzního inženýrství. Toto sedlo by se mělo vyrábět pomocí 3Dtisku. Jako první krok byl vytvořen otisk, který se následně naskenoval pomocí proužkové projekce. Aby bylo možné získat model pouze měkké části, kterou nebylo možné naskenovat v jednom kuse, muselo být provedeno i skenování samotné plastové desky, která byla použita pro vytvoření otisku a oba skeny od sebe odečíst. Následným zpracováním byl vytvořen stl model měkké části sedadla, který by bylo možné nalepit na zakoupenou podpůrnou desku a používat jej při jízdě na kole.

Dalším krokem bylo vytvořit v sedle odlehčenou strukturu po vzoru zavedených značek. Z důvodu zjištění chování vytištěného sedla byly nejprve vytvořeny vzorky použitých struktur, na kterých byla provedena simulace tuhosti. Následně bylo vytvořeno několik variant s různou hustotou struktury, z nichž jich bylo několik vytištěno z materiálu PLA a část sedla i z flexibilního TPU. Všechny modely se tikly na tiskárně typu FDM. Zde nastal problém, kterým je tisk členitého modelu touto metodou a z materiálu TPU. Vlákno, které se při tisku klade na podložku tiskárny se v tomto případě jen velmi těžko odděluje v rámci retrakce materiálu extruderem, tisk se nedaří v daném místě přerušit a materiál je tažen na další pozici, na výtisku vzniká velice výrazné stringování, které prakticky znehodnotí celou stavbu.

Dalším postupem v této práci by bylo vytištění sedla jinou metodou než FDM. Nejvhodnější volbou se nabízí Multi Jet Fusion, kdy by byl model vytisknut z prášku. K tomuto tisku bych vybral model s šestihranným vzorem povrchu, který nemá na povrchu volné piny a jeho tuhost by se blížila běžně vyráběným sedlům.



## 7 Citovaná literatura

- [1] RAJA, Vinesh a Kiran J. FERNANDES. *Reverse engineering: an industrial perspective*. První. London: Springer, 2008. Series in advanced manufacturing (Springer). ISBN 978-1-84628-855-5.
- [2] *Křižíkova oblouková lampa* [online]. Plzeň [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: [https://industryopen.cz/mista/krizikova-obloukova-lampa/?doing\\_wp\\_cron=1658316674.7277500629425048828125](https://industryopen.cz/mista/krizikova-obloukova-lampa/?doing_wp_cron=1658316674.7277500629425048828125)
- [3] *Druhá světová válka od Armády po Ženy – druhasvetova.com* [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.druhasvetova.com/?p=letadla/nemecko/Heinkel-He-178>
- [4] WANG, Wego. *Reverse engineering: technology of reinvention* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2011 [cit. 2022-06-04]. ISBN 978-1-4398-0630-2. Dostupné z: [https://www.academia.edu/36703560/Wego\\_Wang\\_Reverse\\_Engineering\\_Technology\\_of\\_Reinvention.pdf](https://www.academia.edu/36703560/Wego_Wang_Reverse_Engineering_Technology_of_Reinvention.pdf)
- [5] *Aviation photos - 4 million+ on JetPhotos* [online]. JetPhotos, 2018 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.jetphotos.com/photo/8946170>
- [6] *How Many B-29 Are Still Flying?* [online]. 2021 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://planenerd.com/how-many-b-29-still-flying/>
- [7] POPOV, I. a S. O. ONUH. *Reverse engineering of pelvic bone for hip joint replacement*. 2009, 33(6), 454-459. ISSN 0309-1902. Dostupné z: doi:10.1080/03091900902952634
- [8] WANG, Jie, Li MIN, Minxun LU et al. Three-dimensional-printed custom-made hemipelvic endoprosthesis for primary malignancies involving acetabulum: the design solution and surgical techniques. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2019, 14(1). ISSN 1749-799X. Dostupné z: doi:10.1186/s13018-019-1455-8
- [9] Here's why 3D Printing through reverse engineering can revolutionize how prosthetics are made!. *Tesseract* [online]. Tesseract, 2020 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://www.tesseract3d.com/3d-printing-through-reverse-engineering-revolutionize-prosthetics/?doing\\_wp\\_cron=1646163449.3242940902709960937500](https://www.tesseract3d.com/3d-printing-through-reverse-engineering-revolutionize-prosthetics/?doing_wp_cron=1646163449.3242940902709960937500)
- [10] F1 seats: a tight fit!. *F1i.com* [online]. DIGITAL MOTORSPORT MEDIA, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://f1i.com/magazine/2546-f1-seats-tight-fit.html>

- [11] Are you sitting comfortably? The science of F1 seat fitting. *Motorsport Technology* [online]. Motorsport Technology, 2016 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://motorsport.tech/formula-1/f1-seat-fitting>
- [12] Footscan - nejpřesnější a nejmodernější analýza došlapu. *Top4Running* [online]. Praha: Top4Running, 2010 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://top4running.cz/pg/footscan>
- [13] XU, Chao, Xin-Xin WEN, Lu-Yu HUANG, Lei SHANG, Zhao YANG, Ya-Bo YAN a Wei LEI. Reliability of the Footscan® Platform System in Healthy Subjects: A Comparison of without Top-Layer and with Top-Layer Protocols. *BioMed Research International*. 2017, 2017, 1-9. ISSN 2314-6133. Dostupné z: doi:10.1155/2017/2708712
- [14] *Posedla* [online]. Varnsdorf: Posedla, 2022 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.posedla.com/>
- [15] Startup Posedla chce vyrábět highend sedla 3D tiskem v Česku. *MTBS.cz - cyklistické zpravodajství* [online]. Cycling Media s.r.o., 2021 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://mtbs.cz/clanek/startup-posedla-chce-vyrabet-highend-sedla-3d-tiskem-v-cesku/kategorie/doplanky-na-kolo#.Ythvz4TP2UI>
- [16] Review: Specialized S-Works Power Mirror Saddle w/ 3D-printed carbon padding. In: *BIKERUMOUR!* [online]. Bikerumor, 2020 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://bikerumor.com/review-specialized-s-works-power-mirror-saddle-w-3d-printed-carbon-foam-padding/>
- [17] What is Reverse Engineering – Reverse Engineering Definitions, Purposes, Process & Steps | CNCLATHING. *CNCLATHING* [online]. Junying Metal Manufacturing, 2021 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.cnclathing.com>
- [18] What Is Reverse Engineering and How Does It Work?. *Astro Machine Works* [online]. 2019 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://astromachineworks.com/what-is-reverse-engineering/>
- [19] BERÁNEK, Libor. *Průmyslová metrologie. Praha. . ČVUT, FAKULTA ST: Studijní podklad. STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE.*, 2021.
- [20] KOTRČ, Jiří. *VYUŽITÍ CHROMATICKÉHO SENZORU BÍLÉHO SVĚTLA V RÁMCI KONTROLY KVALITY*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [21] Prepared for all challenges - today and tomorrow ZEISS CONTURA. In: *ZEISS Česká republika* [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z:

- <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/contura-2019.html>
- [22] VEGARA, Francisco, Pedro ZUCCARELLO, Jose BOLUDA a Fernando PARDO. Taking Advantage of Selective Change Driven Processing for 3D Scanning. *Sensors*. 2013, 13(10), 13143-13162. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s131013143
- [23] Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. *Automatizace.hw* [online]. 2015 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [24] Portable Laser Scanner for Fast Data Capture. *Tecnologia óptica e optoeletrônica da ZEISS Brasil* [online]. ZEISS [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com.br/metrologia/produtos/sistemas/optica/digitalizacao-3d/zeiss-t-scan.html>
- [25] How do 3D Scanners Work?. *Matter and Form* [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://matterandform.net/blog/how-do-3d-scanners-work?d>
- [26] Optical Tracking Explained. *Optical tracking systems for industrial, academic and medical applications | PS-Tech* [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.ps-tech.com/optical-tracking-explained/>
- [27] Your mobile measuring room. *HandsOnMetrology* [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://www.handsonmetrology.com/products/t-scan/#Technical\\_Data](https://www.handsonmetrology.com/products/t-scan/#Technical_Data)
- [28] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. První. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [29] RIBBENS, Bart. *Development and validation of a time domain fringe pattern analysis technique for the measurement of object shape and deformation*. Brussel: VUBPRESS, 2015. ISBN 978 90 5718 381 2.
- [30] Application Example: Reverse Engineering. *GOM Metrology* [online]. GOM mbH, 2010 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://www.gom.com/uploads/media/ceramics\\_EN.pdf](https://www.gom.com/uploads/media/ceramics_EN.pdf)
- [31] The ZEISS COMET. *Contract Dimensional Inspection Services | Total Quality Systems* [online]. Total Quality Systems [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.tqscorp.com/docs/products/Zeiss-Comet.pdf>

- [32] Comet L3D - 5MP Overview. *3D Scanning & Laser Tracking Services, Equipment & Software for Precision Measurement* [online]. Florida: Engineering & Manufacturing Services, Inc [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://ems-usa.com/products/3d-scanners/zeiss/comet-l3d-5mp/>
- [33] EBERT, James I. Photogrammetry, Photointerpretation, and Digital Imaging and Mapping in Environmental Forensics. *Introduction to Environmental Forensics*. Elsevier, 2015, , 39-64. ISBN 9780124046962. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-404696-2.00003-5
- [34] A Brief Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing. *GIS Lounge* [online]. USA: GIS Lounge, 2015 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.gislounge.com/a-brief-introduction-to-photogrammetry-and-remote-sensing/>
- [35] *Basics of Photogrammetry* [online]. GIS Resources, 2013 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://gisresources.com/basic-of-photogrammetry\\_\\_2/](https://gisresources.com/basic-of-photogrammetry__2/)
- [36] Chromatic White Light Sensor. *Science Forward*. [online]. San Jose: Covalent Metrology Corp [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://covalentmetrology.com/wp-content/uploads/2020/09/FRT-Sensor-Brochure-Spec-Sheet.pdf>
- [37] Konfokální princip optického měření vzdáleností. *Automatizace.hw* [online]. 2016 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/konfokalni-princip-optickeho-mereni.html>
- [38] SMUTNÝ, Dominik. *Možnosti využití chromatického senzoru bílého světla při rozměrové kontrole kvality*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [39] DRAGANČEV, Simeon. *Strategie extrahovaných bodů při měření na souřadnicových měřicích strojích*. Praha, 2020. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
- [40] TESAŘ, Matouš. *Reverzní inženýrství jako zdroj dat pro aditivní technologie výroby*. Praha, 2021. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [41] Výstupní data. *3D SCAN* [online]. Brno: SolidVision [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/vystupni-data/>
- [42] Reverse engineering. *Dimensio* [online]. Brno: PeckaDesign [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://dimensio.cz/reverse-engineering>
- [43] NX for Manufacturing. *PLM - Správa životního cyklu výrobků: Siemens software* [online]. Siemens [cit. 2022-06-04]. Dostupné z:

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/products/manufacturing-planning/additive-manufacturing.html>

- [44] ZEISS REVERSE ENGINEERING. *ZEISS United States of America, optical and optoelectronic technology* [online]. ZEISS [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/software/reverse-engineering.html>
- [45] *The fastest route to the perfect tool* [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: [https://www.zeiss.com/metrology/\\_successstories/tool-correction-using-zeiss-reverse-engineering.html](https://www.zeiss.com/metrology/_successstories/tool-correction-using-zeiss-reverse-engineering.html)
- [46] Geomagic Design X. *3D Printers, Software, Manufacturing & Data Healthcare 3D System* [online]. 3D Systems, Inc [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>
- [47] GOM Inspect Pro. *GOM Metrology* [online]. [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/gom-suite/gom-inspect-pro>
- [48] What is 3D printing?. *Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>
- [49] *Aditivní výroba - Obecné zásady - Terminologie*. 08/2017. 2017.
- [50] Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi. *Prusa Knowledge base* [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2022 [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi\\_112464](https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi_112464)
- [51] MJF (Multi Jet Fusion). *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [52] Polyjet. *Výroba prototypů světové kvality | 3D Tech* [online]. 3D Tech, 2016 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/technology/polyjet/>
- [53] 3D Printing Materials Guide: Plastics. *3D Printing & 3D Printers : News, Reviews, Best Prices, Trends...* [online]. 3Dnatives, 2020 [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/>
- [54] Features of TPU filament. *Tractus3D - Advanced industrial 3D printers* [online]. Waardenburg, 2020 [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/materials/tpu/>

[55] ATOS Compact Scan. *MCAE* [online]. Kuřim: MCAE Systems, s.r.o [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/atos-compact-scan/>

## 8 Seznam obrázků

Obrázek 1: Postup Reverzního inženýrství.....	12
Obrázek 2: Oblouková lampa [2].....	14
Obrázek 3: První proudové letadlo He 178 [3].....	14
Obrázek 4: Rackové, jejichž křídla se stala inspirací pro křídla letadel [1].....	15
Obrázek 5: První letadlo [1].....	15
Obrázek 6: Tupolev TU - 4 [5].....	17
Obrázek 7: B29 [6] .....	17
Obrázek 8: Model části pánve [7].....	18
Obrázek 9: Hlavice kyčelního kloubu [8].....	19
Obrázek 10: Model náhrady kyčle [8].....	19
Obrázek 11: Pilot v šasi F1 během obtiskávání zad do pěny [11] .....	20
Obrázek 12: Výstup ze scanneru Footscan [13].....	21
Obrázek 13: Sedadlo projektu Posedla [14].....	23
Obrázek 14: 3D tištěné sedlo Specialized [16].....	24
Obrázek 15: Souřadnicový měřicí stroj [21] .....	28
Obrázek 16: Postup zpracování dat při snímání kamerou [19] .....	29
Obrázek 17: Schéma triangulace [22] .....	30
Obrázek 18: Laser scanner [24].....	31
Obrázek 19: Schéma optického trackování [26].....	32
Obrázek 20: Laserový scanner T - Scan [27] .....	33
Obrázek 21: Pruhová projekce [29] .....	34
Obrázek 22: Scanner ATOS [54] .....	35
Obrázek 23: ZEISS Comet [32].....	36
Obrázek 24: Schéma chromatického senzoru bílého světla [39] .....	38
Obrázek 25: Mračno bodů získané skenováním [41] .....	41
Obrázek 26: zesíťovaný model [41].....	41
Obrázek 27: Prostředí ZEISS Reverse Engineering [45] .....	43
Obrázek 28: Rozdělení aditivních technologií .....	46
Obrázek 29: Konstrukce kartézské tiskárny [50].....	47
Obrázek 30: Delta tiskárna [50].....	48
Obrázek 31: Polar tiskárna [50].....	49
Obrázek 32: Zleva: Laser SLA; DLP - SLA; MSLA; hotový výtisk [50] .....	50
Obrázek 33: Schéma SLS [50] .....	51
Obrázek 34: Pohled na dolní stranu sedla.....	55
Obrázek 35: zleva - Koupené sedlo, pěnová stélka, očištěná základní deska...	56
Obrázek 36: Modelovací hmota na plastové desce .....	57
Obrázek 37: Deska s modelínou přišroubovaná ke kolu .....	58
Obrázek 38: Otiskování .....	59
Obrázek 39: Hotový otisk.....	60
Obrázek 40: Skener Comet .....	61
Obrázek 41: Otisk v pohledu kamery skeneru .....	62
Obrázek 42: Sken spodní strany otisku .....	63
Obrázek 43: Díry v modelu .....	64

Obrázek 44: Zaplněné díry v modelu .....	64
Obrázek 45: Model sedla s modelínou .....	65
Obrázek 46: Model nosné desky .....	65
Obrázek 47: Model importovaný do NX.....	66
Obrázek 48: Modelování polygonů .....	67
Obrázek 49: Funkce Vyhladit.....	67
Obrázek 50: Vyhlazené těleso .....	68
Obrázek 51: Importovaná tělesa v Meshmixeru.....	69
Obrázek 52: Elektronický otisk desky do modelu sedla .....	70
Obrázek 53: Upravený válec.....	70
Obrázek 54: Díra v modelu.....	71
Obrázek 55: Rozhraní mezi deskou a modelínou .....	72
Obrázek 56: Zarovnávaní hran.....	72
Obrázek 57: Výsledek zarovnaní převisů .....	73
Obrázek 58: Detail přechodu mez ploškami .....	73
Obrázek 59: Model v NX .....	74
Obrázek 60: Vyhlazení spodní strany modelu .....	75
Obrázek 61: Rozdělování trojúhelníků.....	76
Obrázek 62: Vyhlazování hran .....	77
Obrázek 63: Detail zaoblených ploch .....	77
Obrázek 64: Vytvořený model otisku 1.....	78
Obrázek 65: Vytvořený model otisku 3.....	79
Obrázek 66: Hustá struktura .....	80
Obrázek 67: Nakloněná, řídká struktura .....	80
Obrázek 68: Řídká struktura .....	81
Obrázek 69: Struktura s šestistěnným vzorem.....	81
Obrázek 70: Tvorba odlehčené struktury.....	82
Obrázek 71: Volné piny .....	83
Obrázek 72: Model 1 .....	84
Obrázek 73: Detail modelu 1.....	85
Obrázek 74: Model 2.....	86
Obrázek 75: Detail modelu 2.....	86
Obrázek 76: Model 3.....	87
Obrázek 77: Detail modelu 3.....	88
Obrázek 78: Model 4.....	89
Obrázek 79: Detail modelu 4.....	90
Obrázek 80: Model 5.....	91
Obrázek 81: Detail modelu 5.....	91
Obrázek 82: Model 6.....	92
Obrázek 83: Detail modelu 6.....	93
Obrázek 84: Model 7.....	94
Obrázek 85: Model v GrabCAD .....	95
Obrázek 86: Parametry tisku .....	96
Obrázek 87: Napolohovaný model .....	96
Obrázek 88: Naslicovaný model .....	97



Obrázek 89: Vizualizace detailu výtisku .....	98
Obrázek 90: Detail 2 .....	98
Obrázek 91: Postup tisku modelu .....	99
Obrázek 92: Prostředí systému Prusa Slicer .....	99
Obrázek 93: Nastavení tisku .....	100
Obrázek 94: Měřítka a rozměry.....	101
Obrázek 95: Pokročilejší nastavení .....	101
Obrázek 96: Absence raftu.....	102
Obrázek 97: "Naslicovaný model" .....	103
Obrázek 98: Vizualizace tisku .....	103
Obrázek 99: Parametry výtisku.....	104
Obrázek 100: Hrubé (vlevo) a jemné (vpravo) sedlo vytisklé na Průša tiskárně .....	105
Obrázek 101: Struktura hrubého sedla.....	105
Obrázek 102: Vlevo - průběh tisku na Stratasys; Vpravo - detail výtisku.....	106
Obrázek 103: Tvorba skořepiny.....	107
Obrázek 104: Vnitřní struktura.....	108
Obrázek 105: Řez naslicovaným sedlem s vnitřní lattice strukturou.....	109
Obrázek 106: Tisk modelu s vnitřní lattice strukturou na tiskárně Průša .....	110

## 9 Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry modelu 1 .....	85
Tabulka 2: Parametry modelu 2 .....	87
Tabulka 3: Parametry modelu 3 .....	88
Tabulka 4: Parametry modelu 4 .....	90
Tabulka 5: Parametry modelu 5 .....	92
Tabulka 6: Parametry modelu 6 .....	93
Tabulka 7: Parametry modelu 7 .....	94